目　录

绪　　论

——人类生存发展和生态环境、地球科学的关系

一、人类和自然环境的关系

人类的生存、繁衍和发展是以地球上的自然生态环境为物质基础的，保护地球上的生态环境就是保护人类生存和发展的物质基础。一方面人类生存的物质基础是自然生态环境，另一方面，人类为维护自身的生存发展，必须保护自然生态环境。这是人类和自然生态环境关系的两个方面。

人类生活的环境是在地球的表层，在由空气、水、岩石和土壤构成的大气圈、水圈、岩石圈的交汇处形成生物圈内。在生物圈中，在太阳能的作用下，产生物质循环和能量流动，其表现形式之一是包括人类在内的生物的生存、发展、演化。根据测定，人类血液中所含60余种化学元素的比例与地壳内化学元素的比例极为接近，这证明人是自然环境的产物。人体还通过新陈代谢和自然界进行物质交换和循环：吸入氧气，呼出二氧化碳；摄入水和营养物质，维持人体的生长、发育和繁衍；机体死亡后，其所含化学元素又回归自然界。

自然界生态环境的改变，在颇大程度上是由于人类对自然资源的开发利用。在人类生存的早期，由于人口少，生产力发展水平低，利用自然资源的能力有限，因此对自然生态环境的影响和破坏有限。从人类开始"刀耕火种"，进入农耕时代起，首先是毁林开荒，对自然生态环境有了明显的破坏。进入工业革命时期以后，特别是进入20世纪以来，生产力水平迅速提高，对自然资源的开发利用达到空前的规模。据估算，现代农业提供的农产品能维持50～60亿人口的生存，而原始土地上光合作用产生的绿色植物及其供养的动物，只能维持约1000万人口的生存。人类在生产了巨大物质财富，创造了高度物质文明的同时，也对自然生态环境造成了日益严重的破坏：大气层污染严重，水资源污染更加剧了淡水资源短缺，森林覆盖率逐年降低，全球土地荒漠化发展，可耕地面积减少，相当多的生物物种濒临灭绝，这些都对人类的生存和发展构成威胁。因此保护大自然，维护生态环境是21世纪全世界、全人类面临的最重要的问题之一。

二、地球科学的功能，地球物理学与环境科学的联系

作为地球科学重要分支的地球物理学，其功能是：资源勘察、防止地质灾害、保护生态环境、认识地球。其中认识地球是地球物理学，也是地球科学的最根本的任务，而资源勘察、防止地质灾害和保护生态环境是地球物理学科的主要应用领域。在20世纪，人类的物质文明以有人类历史以来最快的速率达到前所未有的高度，从根本上来说，是以极大的规模勘察、开发、利用地球上的自然资源为依托的。而尤其是矿物资源（包括化石能源——煤、石油、天然气、油页岩等，金属及非金属矿产，建筑材料等）的勘探、开发不仅推动了地球物理学科的发展和深化，也为地球物理学和地球科学的发展提供了经济支持。自然资源的开发、利用在使人类的物质文明发展的同时，也使地球的生态环境发生变化，目前由于人类活动的影响已使地球上的某些演化过程加速，其中由于使用化石燃料产生的CO_2持续升高而使全球大气层变暖的过程加速，继之而来的土地荒漠化问题、淡水资源的匮乏及污染问题，

使科学家和整个人类社会日益深刻的认识到：生态环境问题实际是资源问题的继续。因此，曾在资源勘测、开发中起过重要作用的地球物理学及地球科学，在新世纪中应该在生态环境领域起更大的作用，甚至应该使保护生态环境成为地球物理学及地球科学的主要应用领域。

环境（Environment）一词的定义是："作用于一个生物体或生物群落上并最终决定其形态和生存的物理、化学和生物等因素的综合体"（1999 年版《不列颠百科全书，国际中文版》）。这是对环境的一种学术上的定义，其中难免有不严格的地方，例如，对"生物等因素"是否包括人类的认识和思维活动，上文并没有说清楚。1989 年颁布的《中华人民共和国环境保护法》所指的"环境"是："影响人类生存和发展的各种天然和经过人工改造的自然因素的总体，包括大气、水、海洋、土地、矿藏、森林、草原、野生生物、自然遗迹、自然保护区、风景名胜区、城市和乡村等"。这是一种法律的定义，所说的环境是限定于"影响人类生存和发展"的总体，其目的是对人的活动范围加以界定。本书中所指的"环境"包括对上述两种定义理解，即承认环境是影响人类或生物生存发展的总体，作用于环境的因素则是"物理、化学和生物学等因素的综合体"，即承认自然界的各种演化过程，特别是地质活动过程是影响地球上整个生物群体重要因素；同时也承认人类的物质财富的生产活动，对生态环境的变异产生重大影响。本书原则上不讨论人类生存的人文因素（如宗教信仰、意识形态、社会制度等）对环境影响。但应该指出，人文因素对环境的影响是明显的。从人类社会发展和环境的关系来说，在原始社会阶段，人类的生产水平有限，对生态环境的破坏作用轻微，人类生存是完全依赖于自然界。在农耕社会阶段，人类以农业生产活动为中心，开始以一定规模利用自然资源，但人类生产活动的效益还处于"听天由命"、"靠天吃饭"的状态，人类对自然环境只能是顺应的态势。约 300 年前的工业革命，使人类的生产水平有了突变的进步，人类为在创建前所未有的物质文明的同时，在"人类改造自然"。"人类是自然界的主宰"一类观念指导下，对大自然资源进行掠夺，生态环境开始迅速恶化。现代社会，人类认识到违背自然规律，掠夺性的开发自然资源，最后必将危及人类本身的生存，因此提出"可持续发展"等观念，引导人类和自然界协调发展。还要指出，指导人类活动的某些政策、观念对生态环境的影响是相当明显的。例如，人类对资源开发和消费的认识和理解往往会对人类生存的生态环境产生重大影响（例如"大炼钢铁"、"大跃进"）。另外，人们对野生动物作用或价值的理解差异对某些野生动物物种的生存产生严重威胁，例如，以市场导向为背景的象牙贸易和藏羚羊绒贸易将导致非洲野生象和西藏藏羚羊的生存危机；以饮食习惯导向为背景的食用某些野生动物（如"蛇年吃蛇"），将会导致这些物种的生存危机，并会造成生态环境某些局部的失衡（农田鼠害）。还有，在新中国历史上成为笑柄的"消灭麻雀"，险些酿成农田虫害蔓延大祸。

环境污染（Environment Pollution）是"向环境增添任何物质或能量（如热），其速率超过环境通过分散、分解、再循环或以某种无害形式储存起来而可容纳的速率。传统的对自然环境污染被认为是人类在制造业、运输业、农业和废物处置等活动中大都无意而有害的结果，高度的污染大都是工业化、城市化和人口迅速增长的结果"（见 1999 年版《不列颠百科全书，国际中文版》。要说明的是，污染（Pollution）最原始的定义是指印度教中种姓高贵者与贱民的各种接触；净化（Purification）则是印度教为消除种姓污染的宗教惩罚和礼仪形式。显然，向环境中增添的物质和能量，主要是人类开发利用资源，尤其是矿产资源（包括能源）的结果。

通俗地说，地球物理学，尤其是勘探地球物理学（或应用地球物理学）的本质是要把各

种矿产资源从地球的岩石圈中找出来。而环境地球物理学的重要内容则是要追踪被人类开发利用的资源（主要是矿产资源）在地球上各部分的去向（尤其是在生物圈内的分布）及其后果。因此应该认为环境地球物理学是勘探地球物理学科发展的合理延续。

三、正视生态环境问题

对于人类面临的生态环境问题，应该注意两种偏向：一种是把经济发展和物质文明的进步看成是灾难的前兆，这种偏向会使人类丧失进取精神。另一种是只为一时的经济效益，过量的开采自然资源而且利用不合理，这是对子孙不负责的恶行。过去的某些口号，如“人定胜天”，“不应等待大自然的恩赐，而应向大自然索取”，“人类改造自然，征服自然”，都有相当的片面性，甚至是不科学、反科学的。还有企图以政治运动的方式消灭某个生物物种（如麻雀等），则只能说是荒唐。新中国历史上有过“大跃进”、“大炼钢铁”的惨痛教训，但对这一教训的原因和后果，只是从政治上总结得多，而对其出于农民急于致富的心态而对生态环境及资源储备的破坏等一系列违背科学规律的做法，还没有更深刻的反思，以至20世纪70年代以来，以浪费和不合理开发资源及恶化生态环境为主要负面影响的的乡镇企业，由于决策层的认识的局限或失误，致使生态环境恶化过程加速、加剧，而至今尚无深刻反思。应该说，对领导人及社会的评价，固然有物质文明及发展速度的标准，但更严格的历史标准是：对人类长期的发展是有功，还是有过。领导人的失误将会祸及子孙，“利在当代，罪在千秋”的行为将成为人类发展过程中的败笔，历史无情，当局者不可不鉴。

四、新的学科——环境地球物理学

20世纪末到21世纪前期将是人类社会，经济发展发生重大变革的时期。当今世界的资源开发、全球气候及生态环境变化、自然灾害，尤其是气象灾害和地质灾害的预测及防止等问题都成为全世界面临的日益紧迫的重要问题。而且这些问题都与地球科学息息相关：地球上生态环境的变化主要是由于自然资源（尤其是矿产资源）开发利用而引起的，生态环境问题实际上是资源开发问题的后续问题。曾在矿产资源勘察开发中起过重要作用的地球物理学科（尤其是勘探地球物理学科）应该而且可能在生态环境领域发挥作用。

传统的地球物理学科的分支学科是固体地球物理学、海洋物理学、大气物理学和空间物理学，其研究对象分别为岩石圈、水圈、大气圈和地球外层空间。而新兴的环境地球物理学的研究对象则主要是岩石圈、水圈、大气圈交汇部的生物圈。矿产资源的地球物理勘探可在岩石圈的局部区域独立进行，勘探地球物理学科的研究对象可根据研究目的进行某些分割，研究对象可视为若干独立的区块，因此主要讨论各区块相对独立而完整的地球物理场的特征。而环境地球物理学更希望把生态环境问题作为一个整体对待，也就是说环境地球物理学科更强调研究对象的整体特性。就固体地球物理学的研究对象——岩石圈而论，尤其是就矿产资源的勘探问题而论，研究对象——矿体通常被视为稳态或变化周期较长的似稳态。而环境地球物理学的研究对象——生态环境则是变化过程相对来说快得多的非稳态过程。为解决生态环境问题所进行的地球物理观测的规模、精度，所处理的数据量及要求的数据处理速度都要大大超过传统的地球物理学科。从传统的地球物理学科向环境地球物理学科的演变，也符合现代科学技术发展进步的一般规律。

五、环境地球物理学科的发展、现状和特点

国外在20世纪80年代提出“环境地球物理”（Environmental Geophysics），即1985年在地球物理学科的经费分配列出了环境项目；1988年出现了《环境地球物理》论文集的征文启事；1992年，澳大利亚的R.J.Whiteley提出“环境地球物理是有关寻找、圈定和监测

任何成因的地下灾害的学科”。这种定义的主要思路是侧重将地球物理方法引入地质灾害（重点是地下灾害）研究，而且对地质灾害成因的认识也不局限于自然界的地质运动，而是包括了人类活动可能造成的地质变化和灾害。但这种定义限定的研究对象似乎仍然是岩石圈。

1990年原苏联的A.A.Огильви提出地球物理学科的一个新方向是“生态地球物理”（Экологичесая геофизика），其主要内容是：“研究自然—人类活动—地球系统内形成的物理场”，并对自然界和人类活动“对地质环境的负面变化做出评价及预测”，认为多元的自然—人类活动会引起物理场和地质环境的异常，生态地球物理的观测空间包括宇航观测、大气层（空中）观测、地表观测和井下观测等四个层次。目前俄罗斯文献中提到的生态地球物理，实际上和本书及国内文献中提及的环境地球物理在概念是接近的。1991年，原苏联地质部的K.И.Сычев提出：“环境地球物理学是研究地球物理场（重力场、地震波场、电磁场、核辐射场）与自然环境和人类活动关系的学科”。

在中国，1986年1月中国地质学会成立了环境地质专业委员会，1993年2月中国地球物理学会成立了环境地球物理专业委员会，开始有组织的对国内外这一领域的工作进行调查研究，并陆续有论文发表。1994年由中科院院士刘光鼎为组长的“地球物理学发展战略研究组”在《自然科学学科发展战略调研报告，地球物理学》（科学出版社，1994年）中提出，应该用地球物理学方法进行环境污染的监测研究。该报告指出：“地球物理学科应在环境科学方面开拓新领域，逐步形成环境地球物理学。该学科的功能和研究领域应是促进我国资源，尤其是矿产资源长期、合理、均衡地开发和利用。另外还要对某些重大工程（如三峡工程）可能造成的生态环境变化及地质灾害进行研究”。该报告还指出：“由于环境地球物理目前尚未发展成一个完整的学科，因而近期内环境地球物理学的探索方向是：在环境发生变异的物质流运动过程中，相应的地球物理信息流的变化，应关注海洋生态系统，河口生态系统、淡水生态系统及陆地生态系统中声、光、电、磁、热等物理场的变异”。1995年楚泽涵等提出，人类面临的生态环境问题实际是资源开发问题的后续，因此应该重视将地球物理学科的研究对象和应用领域从传统和优势的资源勘察和开发领域向生态环境领域的延拓。并提出环境地球物理学的内容是将地球物理学的概念、方法、技术融汇入环境科学的主要领域：大气圈及水圈的污染、监测；陆地资源、生态环境的保护。要解决的问题是，生态环境变化引起的地球物理场的异常变化问题；人类活动对地球演化过程的影响及作用评价问题；对治理污染、恢复生态环境的各项措施的效果的考察和评价问题。认为环境地球物理学必须以地球整体为观测研究对象，并从地球演化过程来考察人类生存的生态环境。1997年楚泽涵等进一步提出环境地球物理学的研究方向应包括：

第一，研究自然灾害及人类活动引起的大气圈、水圈及地表的变化，并对这种变化的后果进行评价。

第二，以保持岩石圈表面的生态功能为目的，研究评价岩石圈表面生态环境稳定性的方法和理论。

第三，以保持岩石块体的生态功能为目的，研究控制岩石块体的状况和性质的方法和手段，其中包括对地震及各种地质灾害的预测和监控。

除此外，还提出国内外在以下6个方面的研究方向和进展，这6个方面是：地下水及地表水体污染的测量和监控；用地球物理方法评价工业区的生态环境；城市中的地球物理监测；用地球物理方法查明废弃弹药隐藏地区和位置；用地球物理方法监测核爆炸；用地球物

理方法监控地震及其他地质灾害。

1997年9月，中国地球物理学会环境地球物理专业委员会编著的《环境地球物理》(地球物理科普文选，第三集）出版，该书由多名资深专家执笔概述了国内外环境地球物理学科的发展，介绍了环境地球物理方法，讨论了环境地球物理学在环境科学中的应用，论述了地球物理学和全球变化研究。

1997年12月由崔霖沛等编著的《环境地球物理方法及其应用》出版，这本书是国内最早的、系统的讨论环境地球物理学的专著。此书的副标题为：环境污染、灾害及地球物理场环境效应的监测与治理。书中系统的介绍了环境地球物理的工作方法，地球物理场对环境的影响，环境污染的监测和防治，天然和人为灾害的监测和防治。但书中介绍的国内的工作案例则多是用传统的勘探地球物理方法和设备观测记录的在某个局部区域调查结果。

在生态环境科学领域，主要目标或研究方向是：

第一，探索、研究全球范围内生态环境演变的规律。

第二，查明人类的活动（主要是生产活动）对生态环境的影响。

第三，考察生态环境变化对人类生存的影响。

第四，研究区域环境污染的检测、控制、治理的技术和管理措施。

环境地球物理是应用地球物理方法围绕上述目标或方向发展的新学科。应该承认，到目前为止，环境地球物理学科还只是在起步阶段，还没有严格、公认的定义，包括环境地球物理学科的目的、研究对象、应用领域等问题还在研究和发展中，而学科的理论基础、数理方法（正反演方法)、观测空间和观测系统都还在刚开始研究阶段。本书认为，比较完整的环境地球物理学科的框架应该包括或涵盖以下方面：

生态环境问题和地球科学的关系；

世界和我国自然资源（土地、森林、淡水水体、海洋、矿产）勘探开发状况和相关的生态环境问题；

生态环境问题的研究领域（大气圈、水圈、岩石圈、生物圈的由于人类活动产生的环境问题，尤其是城市的环境问题，自然灾害引起的生态环境问题)；

环境问题的历史和生态效应；

大气污染和水体污染及相应的地球物理问题；

环境质量的评价和测报问题；

环境地球物理学的研究对象，环境和勘探地球物理问题的差异；

环境地球物理学的理论基础：环境地球物理的正演和反演问题；

环境地球物理学的方法：实验观测、信息采集、信号处理；

环境地球物理学的应用：各种地球物理场异常在环境质量评价、测报，在生态环境变化预测中的作用；

环境地球物理学科发展的优先领域和21世纪学科发展的展望。

要说明的是，在建立环境地球物理学科的框架时，应注意以下几点：

(1) 生态环境变化原因的认识问题。

狭义的环境类学科只研究人类的生产活动引起的生态环境问题，而将自然界演化（尤其是地质活动）引起的各种变化摒除在环境类学科的研究范围之外。例如1999年版的《不列颠百科全书，国际中文版》中还没有环境科学的定义。“环境工程（Environment Engineering)”词条的说明是：“对供水、垃圾处理、各类污染防治等工序及基础设施的开发，旨在

通过防止疾病传染来保护公众健康，并通过阻止空气、水和土地资源的污染和恶化来维护环境质量。它传统属于人文工程的一个专门领域。环境工程的课题包括饮用水的处理和分配、污水的搜集、处理和处置，空气和噪声污染的控制，城市固体废弃物和有毒废弃物的管理，有毒废弃物场地的的清理，以及环境评估、检查和影响的研究"。而"环境地质学（Environmental Geology）"词条的说明是："研究利用地质学的基础知识于国土利用与市政工程的学科，它涉及到人类活动对自然环境的影响（例如由污物和毒性化学废料引起的水源污染）。环境地质学涉及的其他的重要内容包括采矿区的重新开垦，为建造房屋、核能工厂和其他设施确定地质上稳定的地点，以及圈定建筑材料，如砂、砾石的来源地"。从这些定义来看，传统的环境工程和与环境有关的学科都限于与人类活动有关的生态环境问题。而地球科学，尤其是地球物理科学则是以研究地球本身的演化过程为重要内容。而地球的演化过程、地质活动不可避免的会对地球上的动植物的生命活动过程，对人类活动发生影响。从大的地质时空演变尺度来说，地球表面的海陆变迁，气候变异（冰期）等地质演化过程（时间变化过程以数百万年计，空间范围则是地球的全部或大部）会使某些生物灭绝，而另一些生物繁衍，这种地质活动对地球上生物的生命活动的影响是全球性的、长时间的。但是对这类地质演化过程对生态环境的影响侧重在有人类活动以前（如恐龙的灭绝），或虽有人类活动，但还不属于历史范畴（如楼兰古国的消失）。地球上有些局部的短时间的地质活动往往也会造成极为严重的生态环境变化，甚至使局部区域内全部生命死亡，人类活动停止。例如，发生在公元 79 年 8 月 24 日的维苏威火山爆发，使在距离那不勒斯西南 23km 处的庞贝（Pompeli）古城在极短时间内毁灭，全城生命瞬息死灭：先是火山喷发出的熔岩碎块、浮石和其他火山岩屑将庞贝城埋了 3m 多深，全城房舍均遭灭顶，随后火山灰尘落如雨，积灰又厚达 3m，全城居民和动物多数是被火山灰闷死的。这是有历史记录并被考古发掘证实的地质活动引起生态环境急剧变化的事例。此外人类历史上的大地震，尤其是 20 世纪发生的若干次大地震，以及伴随地震发生的海啸等自然灾害和火灾等灾害，都是自然界的变化在短时间内引起生态环境的恶性变化的事例。从地球科学、地球物理学的角度来说，地质活动、地球演化过程引起的自然生态环境的变化，应该是环境地球物理学的研究内容。

（2）环境和勘探地球物理观测对象的差异问题。

从本质上说，环境和勘探地球物理学都是以地球上的地质—物理过程为研究对象。但从具体的观测和研究目标而论，勘探地球物理和环境地球物理还是有些差别。大体上说，勘探地球物理主要研究岩石圈内的物质（元素或有用矿物）分布及其异常，研究观测的目标是地球上某个不大的局部，考察的过程就其物理本质而论是以物质的迁移演化过程为主。环境地球物理则是要研究大气圈、水圈、生物圈中物质和能量分布及运动的过程。就目前的研究对象而论，环境地球物理学的研究更关心生物圈中的物质分布和演化过程，而且更关注在生物圈中的动态过程（如能量演化）。从整体来看，勘探地球物理观察研究的对象是相对稳定的，即在空间位置上稳定，而且所观测到的异常往往不随时间变化（或仅随时间缓慢变化的长周期过程）；而环境地球物理所观测到的异常则是在空间和时间上都是在变化的。环境地球物理学科虽然也考察局部的环境变异，但更关注全球的环境变化问题，认为局部的环境变异是全球环境变化的一个组成部分。表 1 显示从观测的角度看环境地球物理和勘探地球物理的差别。

（3）环境地球物理学科的重要目标是能对生态环境状况进行预测。

目前，勘探地球物理学科的发展使对地下矿产资源的原始状况和开发状况的预测评价成

表 1　从观测角度看环境地球物理和勘探地球物理的差别

	环境地球物理	勘探地球物理
研究目标	环境污染的评价、预测	矿产资源勘察评价、预测
观测对象特点	随时间变化	不随时间变化或缓变
时空特征	小至地区、大至全球	局部，几米至几百千米
观测内容及特点	地球物理场及其变化（日、月、年、世纪、短周期变化）	地球物理场的异常及变化（不随时间变化或缓变、长周期变化）
观测系统	固定网点检测流动过程	流动的观测手段检测固定的异常区域
观测空间	地表、水体、大气圈、宇航及航空，井下、实验室	岩石圈为主（地表、井下）、水体、大气圈、实验室、宇航及航空
观测精度	ppm*级或更精确	1/100，1/10，矿产品位

*1ppm＝10^{-6}（以下同）。

为可能，而且这种预测评价的可置信程度随勘探程度的加深而变大。但对某个地区或某个矿产地的勘探工作（包括开发过程中的补充勘探工作）的全过程可能要持续几年、几十年，甚至上百年，而且就全球范围而论，矿产资源的勘察工作还没有结束，低品位、难开采的矿产资源勘察仍是今后的重要方向，地壳深部还可能有潜在的资源待发现。目前，环境类学科从整体上来说，还只能做到对某个局部地区（如大城市和工矿区）的主要污染（如大气污染）和某些特定地区的某种特定的污染（如海上油田及附近区域的石油类污染）进行实时或适时检测。就目前环境类学科的整体水平而论，还做不到像对天气（气象）状况测报那样进行预测。有些预测结果，如百年内由于温室效应引起大气层平均温度升高问题，不同来源的预测结果，颇有差异，还不能直接据此指导人类的活动，而只能给出一种趋势性的说明。究其原因是，环境类学科目前普遍采用的检测方法是化学原理的定量分析方法，这类方法精度高，对污染物识别准确。但这类方法对采样要求高，分析费时，难于连续、快速、大量进行检测，而没有大量的连续的检测结果，难于做出可信的预测评价。特别是环境问题，要求有网络式的较大范围内的检测结果作为预测的依据。反过来说，勘探地球物理学科现有的以物理方法为主要依托的各种观测技术和系统，虽然能连续、快速、大量的进行观测，而且信息处理的手段也能适应预测的要求，但其观测精度还远未达到环境污染检测的要求。另外，地球物理方法应用于环境污染物的检测可能存在的多解性问题，也需进一步研究。还应该指出，若勘探地球物理方法能在观测精度上有所改进、提高，能逐步适应或达到环境污染物检测的要求，那么这种技术的进步，一方面将会使对生态环境的变化进行预测成为可能，另外也会使对低品位、地球物理场显示为弱反差的矿产资源勘察起到极为明显的推动作用。

第一章　世界和我国自然资源概况

第一节　世界的土地、森林和水资源概况

一、世界的土地资源概况

土地是地球表面未被水淹没的陆地区域。地球赤道的直径为12756km，通过两极的地轴长度为12714km，地球上陆地面积占地球表面积的29.2%。土地是地球上岩石圈和生物圈交汇的区域，是人类生活和生产活动的主要场所，是一个国家国土的主要组成部分，又是最基本的自然资源和生产资料。土地概念包括地貌、土壤、植被等内容，同时又受气候、水文和人类活动等因素的影响。

全世界陆地面积约为143.68亿hm^2（$1hm^2=1$公顷$=10000m^2=0.01km^2$），到目前为止，还有约一半的陆地处于原始的天然状态，即冰川、原始森林、沙漠、苔原和山脉中人迹罕见的区域。工业革命前的1700年，被人类改造和利用的土地仅为陆地面积的5%，到1980年已占到35%。耕地面积的扩大是以森林覆盖率的减少、草原消失为代价。20世纪末，全球耕地面积约为14.15亿hm^2，其中能进行系统灌溉的水浇地约占10%。

二、世界森林资源概况

对于发展中国家，森林的定义是指"林木和（或）竹的树冠面积超过土地面积的10%，而且一般是与野生动植物及未用于农耕的土壤共同处于天然状态下的生态系统"。对于发达国家，森林是指"林木覆盖面积超过20%，并保持有高达7m的树木的土地"。"林木覆盖面积在5%左右的稀疏林地，或生长灌木矮丛的，用于农牧的土地不属于森林"。"毁林面积是指森林中树冠覆盖面积减少到10%以下的区域"（以上定义或概念引自《世界森林状况，1997年》，联合国粮农组织）。

全世界在工业革命前的1万年，由于农耕和用火，地球上的森林面积减少了1/3，工业革命以来的约300年间，又减少了1/3。20世纪以来，森林面积减少的速率还在加快，100年前，全世界森林面积每年减少约21万hm^2；1863～1963年间，平均每年减少1700万hm^2；1963～1978年，平均每年减少4600万hm^2；1978～1990年，在开始注意保护森林资源以后，每年还是平均减少1100～1600万hm^2。

据20世纪90年代后期的统计，1995年世界森林面积为34.54亿hm^2，占世界陆地（南极地区及格陵兰除外）面积的26.6%。世界上森林资源的分布，按森林面积大小依次为：拉丁美洲及加勒比海地区，9.5亿hm^2（占世界森林总面积的27.5%，下同）；原苏联，8.16亿hm^2（23.6%）；非洲，5.2亿hm^2（15.1%）；亚洲和大洋洲，4.91亿hm^2（14.2%）；北美温带和寒温带地区，4.57亿hm^2（13.2%）；欧洲，1.46亿hm^2（4.2%）。世界上拥有森林资源最多的7个国家是：俄罗斯（占世界森林面积的22.1%，下同），巴西（15.9%），加拿大（7.1%），美国（6.2%），中国（3.9%），印度尼西亚（3.2%），扎伊尔（3.1%）。以上7国的森林面积占全世界森林总面积的61.5%。从1980年到1995年，世界森林面积约减少了1.8亿hm^2（平均每年减少1200万hm^2），即相当于墨西哥或印度尼西亚的国土面积。世界森林覆盖率每年约减少0.3%，但发达国家的森林覆盖率为逐年增加，而

发展中国家则逐年减少。例如1990年到1995年，西欧的森林覆盖率每年增加了0.6%，北美每年增加0.2%；非洲和亚洲每年减少0.7%，其中亚洲热带地区覆盖率每年减少1.1%；南美洲每年减少0.5%。由于全世界还有40%的人口（约20亿人）以薪材或木炭作为烧饭和取暖的主要或唯一能源（也还有相当部分的木材制品，最后是被焚烧），因此薪材和木炭在林产品中仍占有相当比重。1970年世界薪材和木炭的消费量为1.185亿m^3（其中发展中国家消费0.998亿m^3，占84.2%）；工业圆材消费量为1.277亿m^3（其中发达国家消费1.099亿m^3，占89.5%）。1994年世界薪材和木炭消费量达到1.89亿m^3（其中发展中国家消费1.697亿m^3，占89.7%）；工业圆材消费量1.476m^3（其中发达国家消费量1.07亿m^3，占72.5%）。林业产品的产值占世界各国国内产值（GDP）总量的2%，占世界商品贸易总额的3%。

三、世界水资源概况

地球有"蓝色星球"的美誉，是因为其表面近71%被水覆盖。在地球上13.8亿km^3的水资源中，97.5%的水为咸水，不能直接利用，只有2.5%的水是淡水。而淡水中，约有70%被冻结在南极和格陵兰的的冰原或附近的冰山中，其余大部分则是土壤中的水分或是深层地下水。江河、湖泊、水库中的水仅占全球淡水总量的约1%，即约为地球上全部水量的0.007%。全世界陆地上每年降水量约110亿m^3，除去蒸发在大气圈中的（约占56%）和被植物吸收的（约占5%），成为江河泾流等地表水的约为全部降水量的39%，即约42.7亿m^3。按1995年世界人口计算（约58亿人），每人约7300m^3，若加上人均年地下水资源（约1038m^3），全世界每人每年的平均淡水资源（以下简称水资源）量为8338m^3（1996年）。按世界通行标准，年人均水资源量在1700m^3以下的为水资源紧张，年人均水资源在1000m^3以下的为短缺。

由于人口的膨胀、城镇增多、工农业发展，使世界淡水的消耗急剧增加。人口的迅速增长，使人均自然资源量、尤其是人均淡水资源量的下降。1900年全世界人口为16亿人，至1996年已达到了58亿人，不到100年人口增加了近3倍。水是维持人的生理活动的重要条件：人体59%～66%是由水组成的，一个人在没有食物的情况下可以生存几周，但没有水最多能活几天。城市的情况也如此，一个城市断绝能源或运输工具还可以维持运转，但如果断绝了水源将很快会变成一座死城。根据联合国统计，本世纪以来世界淡水的消耗量增加了约6倍，其中，农业用水增加5倍，工业用水增加26倍，城乡家庭用水增加18倍。从1950年至1990年的40年间，世界人均淡水消费量增加了近40%。大部分淡水资源被用于农业灌溉，约占全世界总用水量的69%。当今世界人口还在继续增加，粮食的需求有增无减，在先进的灌溉技术一时还难以普及的情况下，农业灌溉用水很难减少。工业用水约占全世界总用水量的22%，这部分用水虽然有潜力可挖，但需要技术和资金，大幅度减少工业用水，尤其是在发展中国家还难以明显见效。饮用水和生活用水只占全世界总用水量的9%左右，人口的增加、城市化进程的加快和生活水平的提高，使饮用水和生活用水消费量逐年增加。1996年全世界用水结构见表1－1。

世界水资源的分布不均衡，65%的水资源集中在10个国家。而占世界人口40%的80个国家都不同程度缺水，全世界有18个国家的约1.66亿人口处于水资源短缺（人均水资源量1000m^3以下），还有11个国家的2.7亿人口处于水资源紧张（人均水资源量1000～1700m^3），很多国家出现了"水荒"。联合国粮农组织认为，长期缺水的国家主要集中在北非、远东和撒哈拉以南的非洲。如非洲可灌溉土地面积4800万hm^2，真正得到灌溉的只有

8%。目前，全世界约有15亿人缺少饮用水，有1/3的人口面临供水紧张的威胁。如果这种趋势发展下去，30年后，全世界2/3的人口将处于供水紧张的环境中。联合国将人均年供水不足1000m^3作为严重缺水国家。按照这个标准，目前世界上最缺水的国家有马耳他、卡塔尔、科威特、利比亚、巴林、新加坡、巴巴多斯、沙特阿拉伯、约旦、也门、以色列、突尼斯、阿尔及利亚、布隆迪、佛得角、阿曼、阿联酋、埃及等。中东地区过去曾拥有丰富的水资源，与中东比邻的尼罗河孕育了古埃及文明，底格里斯河和幼发拉底河酿造了波斯文明。但由于人口的急剧增加，大批土地沙漠化，水资源不足日趋严重。现在，中东是世界上石油资源最丰富的地区，同时也是水资源最贫乏的地区。在沙特阿拉伯这个世界上最大的产油国，1里亚尔（沙特阿拉伯货币）可以买1L汽油，却买不到1瓶矿泉水。中东国家因淡水资源问题一直争执不休，成为中东局势动荡不安的因素之一。阿以之间爆发的5次战争，都与领土和水资源有关。表1－2列出了世界上最缺水的一些国家。

表1－1　1996年世界用水结构

	人均水资源 m^3	年用水量 亿m^3	农业用水 %	工业用水 %	生活用水 %
世界平均值	8838		69	22	9
低收入国	5214		90	5	5
中等收入国	11573		67	24	9
高收入国			39	40	15
中　国	2282	4600	87	7	6
美　国	9259	4673	42	45	13
俄罗斯	30168	1170	23	60	17
印　度	2167	3800	93	4	3

注：材料摘引自世界银行：《迈进21世纪：1999/2000年世界发展报告》；
低收入国家指人均国民生产总值（GNP）760美元以下的国家（未计中国、印度）；
中等收入国家指人均GNP为761－3030美元（平均1710美元）的国家；
高收入国指人均GNP为9361美元以上的国家。

表1－2　世界上最缺水的国家

序号	国家	年人均占有水量，m^3	序号	国家	年人均占有水量，m^3
1	马耳他	82	10	也门	346
2	卡塔尔	91	11	以色列	389
3	科威特	95	12	突尼斯	434
4	利比亚	111	13	阿尔及利亚	527
5	巴林	162	14	布隆迪	594
6	新加坡	180	15	佛得角	777
7	巴巴多斯	192	16	阿曼	874
8	沙特阿拉伯	249	17	阿联酋	902
9	约旦	318	18	埃及	936

表 1-3 是各大洲年人均水资源量。由表 1-3 可以看出，水资源比较丰富的是拉丁美洲和北美洲，俄罗斯、印尼也是水资源比较丰富的国家。亚洲、非洲和欧洲水资源比较贫乏。非洲和拉丁美洲在近半个世纪中人均占有水资源分别减少了 75.2% 和 73.0%。1997 年 6 月联合国环境首脑会议认为：地区性的水危机可能预示着全球性水危机的到来。一些专家更认为，到 21 世纪，水、粮和能源这三种资源中，最匮乏的是水。

表 1-3 各大洲年人均水资源量 单位：m^3

地区＼年份	1950	1960	1970	1980	2000
非洲	20600	16500	12700	9400	5100
亚洲	9600	7900	6100	5100	3300
拉丁美洲	105000	80300	61700	48800	28300
欧洲	5900	5400	4900	4400	4100
北美洲	37200	30200	25200	21300	17500

由于各个国家生活水平和经济结构不同，人均消费水的数量差异很大，世界各国每日人均用水量极不均衡，少的仅有 4L（1L = 1 升 = $0.001m^3$），多的达几百升。如美国每天为 600L，以色列 260L，欧洲 200L，巴勒斯坦 70L，非洲 30L（1996 年中国城乡人口平均日用水量 222L）。这说明发达国家人均耗水量远远高于发展中国家。

由于化学肥料和各种有毒化工制品的污染，使可供人类利用的淡水总量的 1/3 受到了污染。全世界每年排放工业废水和工业污水约 4260 亿 t（1t = 1 吨 = 1000kg），大部分没有净化处理和重复利用，直接排放进入江河湖泊和近海，全球河流稳定流量中已有 40% 的水质发生变化。这些都进一步加剧了人类淡水资源的短缺。

第二节 我国的土地、森林、水及海洋资源概况及生态环境问题

一、土地及耕地

1. 土地及耕地资源概况

我国地处赤道以北，南北相距 5500km 以上，疆域跨越赤道带、热带、亚热带、暖温带、温带、寒温带等 6 个热量带。其中亚热带、暖温带、温带占国土面积的 71.7%，热量条件优越。我国在欧亚大陆东南部，东西相距 5200km，从东部沿海向西，由湿润带（占国土面积的 32.2%）、半湿润带（占国土面积的 17.8%）向半干旱带（占 19.2%）、干旱带（占 30.8%）过渡。由于地质、地貌条件及区域湿润、气温组合的差异，因此土地资源类型多样，为农、林、牧、副、渔业的综合发展提供了有利条件。但是，在国土总面积中，海拔 4000m 以上的山地为 193 万 km^2，戈壁 55 万 km^2，流动沙丘 45 万 km^2，这些难于利用的土地的面积为 293 万 km^2，已占国土面积的 30.7%，加上已被城市、居民点、工矿、道路占用的土地约 67 万 km^2（占国土面积的 7%），全国有占国土面积 1/3 以上的土地不能用于农、林及养殖业。根据 2001 年 11 月“全国土地资源调查”项目公布的资料，我国 960 万 km^2 土地中，占比例最大的是牧草地，约占国土面积的 28%；其次为林地，占 23.9%；耕地占 13.79%。我国草地、森林耕地所占比例为 65.69%，不仅低于美国（87%）、印度（84%）、

原苏联（68%），仅接近世界平均水平（66%）。

据1996年统计，我国耕地约1.3亿 hm^2（19.51亿亩[1]），人均耕地面积仅0.106hm^2（1.59亩），为世界人均值0.24hm^2（3.75亩）的43%。不及俄罗斯的1/8，美国的1/6，加拿大的1/15，甚至只有印度的1/2。全国2800个县中，有666个县的人均耕地面积低于联合国粮农组织规定的警戒线（人均耕地0.05hm^2，即0.8亩），其中463个县的人均耕地甚至不到0.033hm^2（0.5亩）。1997年全国人均耕地面积又降为0.105hm^2（1.57亩），1998年为0.104hm^2（1.56亩），1999年再降到0.102hm^2（1.54亩）。从1996年到1999年，全国耕地减少86.7万 hm^2（1300万亩），平均每年减少28.9万 hm^2（433万亩）。根据截止到2000年10月31日的统计，我国耕地面积为1.2824亿 hm^2（19.23467亿亩），全国人均耕地面积0.1hm^2（1.51亩），为世界人均值的45%。2000年内耕地面积变化如表1-4所示。

表1-4　2000年我国耕地变化情况

建设占地 万 hm^2 （万亩）	灾毁耕地 万 hm^2 （万亩）	农业结构调整 万 hm^2 （万亩）	生态退耕 万 hm^2 （万亩）	开发复垦 万 hm^2 （万亩）	总　计 万 hm^2 （万亩）
-16.32 (-244.9)	-6.17 (-92.6)	-26.56 (-398.54)	-76.28 (-1144.2)	+29.10 (+436.6)	-96.23 (-1443.5)

注：根据国土资源部2001年4月公布资料，-号为减少耕地；+号为增加耕地。

根据上述资料，2000年我国耕地面积净减少96.23万 hm^2（1443.5万亩），预计2010年全国耕地将减少到1.28亿 hm^2（19.20亿亩）。我国66%的耕地分布在山区、丘陵和高原地区，有水源保证和灌溉设施的耕地仅占耕地总数的39.8%。还有453.3万 hm^2（6800万亩）陡坡耕地（约占现有耕地的3%）要实行生态退耕。我国现有0.13亿 hm^2（2亿亩）土地的后备资源，但仅有800万 hm^2（1.2亿亩）可开垦为耕地。考虑到生态环境保护的要求，耕地后备资源的开发受到严格限制，因而通过后备资源补充耕地十分有限。我国耕地的单产水平仅有3000～3750kg/hm^2（200～250kg/亩），比农业发达国家约低1500kg/hm^2（100kg/亩）。

我国耕地中的73.6%为旱地，水田约占26.4%，能进行有效灌溉的耕地面积约0.53亿 hm^2（8亿亩），约占全部耕地面积的40%，但所生产的粮食约占全国粮食产量的3/4，所生产的棉花和蔬菜，则占全国产量的90%以上。但我国耕地的质量总体水平不高，现有耕地中质量好的一等地占41.5%，质量中等的二等地占34.4%，质量差的三等地占20.3%。其中亩产水稻400kg、玉米350kg以上的高产田地仅占全部耕地的27%。有灌溉能力的耕地也面临设备老化、配套不全的问题。近10年来，灌溉面积减少约46.6万 hm^2（700多万亩）。

我国干旱、半干旱地区有近40%的耕地严重退化。后备耕地资源不足而且多分布在人口稀少和缺水的地区，如新疆、云南等地，开发难度大，开发成本高。全国还有宜农荒地约0.33亿 hm^2（5亿亩），其中约有一半为天然草地，适宜种植牧草；还有16%～20%分布在南方山丘地区，预计主要用于发展木本经济作物；剩下的约0.13亿 hm^2（2亿亩），即使全

[1] $10^4m^2=1hm^2=15$ 市亩（以下同）。

部开发，仅能增加可耕地0.65亿hm^2（1亿多亩），还不足以弥补由于各种原因损失掉的耕地。而且新开垦的荒地的经济价值很难比得上被占的城镇郊区、交通干道沿线的优质耕地。面临耕地资源不足的困境，我国的耕地面积还在不断减少。1958～1978年，城乡基本建设用地每年平均达160万hm^2（2400万亩），1986～1996年每年平均净少耕地15万hm^2（750万亩），1997年虽然有各种制止滥用耕地的政策规定，但耕地仍净减少13.5万hm^2（203万亩），1998年由于自然灾害及新开荒面积减少等原因，耕地净减少26.1万hm^2（392万亩）。这种耕地减少的趋势还在发展。

总体来说，我国的土地的类型多，耕地虽然总量多，但人均量少，高质量耕地少，可开发的后备资源少。

2. 我国耕地质量和土壤肥力

前已述及，我国耕地总体质量不高，中低产田（约占2/3）多于高产稳产田。粮食作物的单产水平虽然高于世界平均水平，但与发达国家的水平相比，水稻亩产平均低80～100kg，小麦低100～200kg，玉米低200～300kg。

我国耕地土壤中的有机质含量仅为1%～2%（美国为2.5%～4%），作物需要的营养元素含量偏低：全国约有59%的耕地缺磷；23%的耕地缺钾，14%的耕地同时缺磷和钾；几乎所有耕地都需要补充氮素。由于土壤中有机质和腐殖质含量的减少，其物理性质也在发生变化。由于长期使用无机化肥，我国水稻田有35%发生淀浆板结，20%粘重板结。造成我国耕地土壤肥力下降的原因是长期重用轻养，甚至只用不养。表1－5以东北的黑土为例，说明垦殖10年及50年后有机质、腐殖质和全氮含量的变化。

表1－5　东北黑土垦殖10年及50年后有机质、腐殖质和全氮含量的变化

时　　间	有机质，%	腐殖质，%	全氮，%
垦殖前	7.09	5.97	0.355
垦殖10年后	4.58	4.14	0.268
垦殖50年后	2.93	2.69	0.157

注：资料引自何希吾等《中国资源态势与开发方略》，湖北科学技术出版社，2000年。

中国耕地资源存在的另一问题是土地盐渍化严重。根据中国盐渍土地资源调查，全国有盐渍土地0.99亿hm^2，约占国土面积的1/10。其中现代盐渍化土壤0.37亿hm^2，残余盐渍化土壤0.45亿hm^2，潜在盐渍化土壤0.17亿hm^2。造成土壤盐渍化的重要原因是排灌工程不配套，土壤水分及耕作管理不当。例如20世纪50年代末，在华北平原大规模引黄灌溉，片面强调平原蓄水和盲目种水稻，结果形成了133万hm^2盐渍土。内蒙古的河套灌区，1954～1973年的20年间，盐渍土占耕地面积比例由11%～15%增加到58%；新疆和沿海省份的次生盐渍化问题也相当突出。据估计，我国现有盐碱化耕地约667万hm^2，占耕地面积的1/15左右。

我国耕地土壤现存的另一问题是工业废水、固体废弃物污染，目前受县以上工业污染的耕地面积达400万hm^2，受乡镇工业污染的土地面积达187万hm^2。全国受镉污染的土地面积约1.33万hm^2，受汞污染的土地面积为3.2万hm^2，受氟污染的土地面积为64万hm^2。

此外工业固体废弃物、城市生活垃圾的堆放、填埋还要占用土地，到1985年，累计积存的工业固体废弃物已达54.6亿t，占地5.6万hm^2，其中耕地0.73万hm^2。我国农药年产量566万t，其中一半是药效低（10%以下）、高残毒的有机氯类农药，这些农药施用后，约有80%流入水体、土壤，有统计表明我国受农药严重污染的土地面积超过1300万hm^2；受工业废水、废气、固体废弃物及农药污染的耕地面积约0.27亿hm^2（4亿亩），占我国耕地总面积的约20%。我国每年使用化肥4000万t以上，肥效约30%，化肥使用后的残存物质大多积存在土壤中，其中的硝酸盐和亚硝酸盐对生态环境都有不利的影响。

3. 关于我国耕地的承载能力

这个问题的通俗提法是"中国能养活多少人?"1986－1989年中国科学院自然资源综合考察委员会等单位完成的"中国土地资源生产能力及人口研究"课题的研究结果表明，按中国现有及可能开发的耕地及农业生产水平测算，我国粮食的最大可能生产能力为8.3亿t（为1998年全年粮食产量4.9亿t的1.7倍），按人均消耗500～550kg计，可承载16.6～15.1亿人。据此，近年说中国人口增长的极限值为16亿人。如按1998年全年粮食产量4.9亿t，人口12.48亿人计算，8.3亿t粮食可养活21.1亿人。"养活"标准是每人每天2400千卡热量、蛋白质75g、脂肪65g。折合为一年的消耗量为谷物213kg，肉类25kg，蛋类10kg，奶类6kg，水产品9kg，蔬菜120kg，植物油及食糖各8kg；全部折为粮食约为400kg。按此标准能"养活"的人数也是21亿人左右。

4. 我国土地资源开发与生态环境

自然资源的开发是以生态环境的变化为代价的。以下以新中国建国以来我国农垦开发规模最大的三江平原为例，说明自然资源的过度开发给生态环境带来的变化。

三江平原是黑龙江、乌苏里江、松花江三条大河冲积而成的平原，面积10.89万km^2，其中淡水湿地面积6.67万km^2。这些淡水湿地能涵养水源、调节气候，是多种珍稀动植物的栖息地，有1000多种植物、150余种鸟类、35种兽类在该区域生存，其中国家一级保护动物8种，二级保护动物18种，在保护生物多样性方面有特殊的生态价值。但由于对自然资源的过度开发，该区域的生态环境开始恶化。

1949年三江平原耕地面积仅有66.7万hm^2，从20世纪50年代开始大规模开垦，1985年耕地面积达352万hm^2，1999年发展到370.2万hm^2。新开发的农垦耕地面积占全国同期新增农垦耕地面积的一半。粮食产量达594万t，占全国粮食产量的1.2%。在获得经济效益的同时，所付出的生态环境破坏的代价是巨大的：森林覆盖率由20世纪30年代的36.2%、60年代的29.9%降为90年代末的23.1%；水土流失和风蚀面积达147.7万hm^2。随之而来的是旱涝灾害频率加快。在1970～1990年的20年间，旱灾的次数比1949～1969年增加约10%。

其次，珍稀动植物的生存条件受到严重威胁。例如在七台河流域，国家一级保护动物丹顶鹤的数量在最近10年内，从172只减少为30只。流经三江平原的几十条河流是我国名贵鱼类出产最多的水系，现在鱼类产量已急剧下降，名贵的鲑鱼产量已降为以往正常年景的10%以下。据专家估计，三江平原由于农业开发过度，造成的生态环境破坏，其直接经济损失为40～60亿元。

除了三江平原外，由于过度开发而使生态环境破坏的区域还有：内蒙阿拉善旗居延海绿洲的消失，科尔沁草原的严重退化，黄河的断流，新疆塔克拉玛干沙漠和库姆塔沙漠的合龙。应该说这些事例的危害是严重的，教训是深刻的。

二、森林资源概况

1. 人均森林资源匮乏，分布不均衡，林种结构欠佳

我国 1995 年森林面积为 133.323 万 km^2（1990 年为 133.756km^2，即每年减少约 0.1%），居世界第五位（前四位为俄罗斯、巴西、加拿大、美国），森林覆盖率为 14.3%，在全世界 205 个国家中名列第 121 位，为世界平均值（26.5%）的 54%；人均森林面积仅 0.1hm^2，为世界平均值（0.6hm^2）的 1/6，列世界第 122 位。中国森林蓄材量 97.8 亿 m^3，占世界总量的 2.5%，人均蓄材量 8.6m^3，仅为世界平均值（71.8m^3）的 12%。近年来由于对森林保护的重视程度有所进步，报纸公布：2000 年全国森林覆盖率达到 16.5%（比 1984 年由国家环保局等负责的研究项目《2000 年的中国环境》预计的数值 17.6%略低），按"十五"计划纲要，预计 2005 年，全国森林覆盖率可达 18.2%，仍低于世界平均水平（26.6%）。

我国的森林资源分布不均衡，主要集中在东北和西南，这两个地区的森林面积占全国的 37%，木材蓄积量占全国的 75%。我国西北地区林地极少。表 1－6 为我国各类林地面积及所占比例。

表 1－6　我国各类林地面积及所占比例

用材林 亿 hm^2（%）	经济林 亿 hm^2（%）	防护林 亿 hm^2（%）	薪炭林 亿 hm^2（%）	竹　林 亿 hm^2（%）	特种林 亿 hm^2（%）
0.8（62）	0.13（10）	0.15（12）	0.04（3）	0.14（11）	0.03（2）

注：资料引自第三次全国森林资源清查（1984—1988 年）结果，见《中国资源态势与开发方略》，湖北科学技术出版社，1997 年）；
表中未计疏林地（郁闭度小于 0.3，面积 0.2 亿 hm^2），灌木林地（0.28 亿 hm^2）；
另有资料认为我国各类林地比例为：用材林占 73.2%，经济林占 10.2%，防护林占 9.1%，薪炭林占 3.4%，竹林占 2.9%，特种林（橡胶、漆等）占 1.2%（见《跨世纪全球环境问题及行为对策》，科学出版社，1999 年）。

从上述资料可见，我国森林中防护林比例低，难于发挥生态效益。用材林中，成熟林 20 世纪 80 年代还占 57%（中龄林占 34%，幼林占 9%），80 年代中后期的采伐，使成熟林的面积明显减少。这种趋势若不遏止，21 世纪后期将只有正在生长的中龄林可伐。

2. 资源缺口大，森林保护形势严峻

1990～1995 年全国森林砍伐面积为 866km^2，为世界同期森林净减少（砍伐增加）面积（101724km^2）的 0.8%。1998 年消耗木材 5920 万 m^3，其中仅水泥包装用纸一项就耗用木材 300 万 m^3。全国每年所伐木材中，约有 1/3 被作为薪材烧掉。预计 2000 年中国工业和民用木材量为 1.1 亿 m^3，但国内仅能供给 6500 亿 m^3。20 世纪 90 年代后期，据全国 128 个林业局统计，林区超采（采伐量大于可伐量）约 43%，更新面积仅占采伐面积的 56.5%，在没有更新的面积中约有 1/3 已变成荒山秃岭。造林的成活保存率仅 30%左右。另外，20 世纪 90 年代以来每年森林病虫害面积约 800 万 hm^2（8 万 km^2），1998 年因病虫害致死的林木约 4 亿株，折合林地 25 万 hm^2（2500km^2），相当于每年人工造林面积的 6%。我国虽然是世界上人工林面积最大的国家，但是每公顷成熟的人工林的蓄材量仅 71.53m^3，只是成熟天然林蓄材量的 41%。另外，我国林业产业的发展水平不高，木材加工业的主要产品仍是圆木、锯材等低附加值的初级产品，木材综合利用率只有 40%，不及林业产业发达国家的一半。

要说明的是，有些林产品的生产方向值得关注：目前国内一次性筷子使用极普遍，全国有几千家木筷制造厂，每年消耗的木材约 500 万 m^3，相当于北京市在新中国建国以来植树

造林所积蓄的全部木材量。还要特别说明的是，有些国家通过林产品贸易向中国转嫁生态危机，如日本每年从中国进口一次性木筷200亿双，折合木材40万m^3，而且还指定要桦木的、没有节疤的。日本在全国有木筷回收网络，回收的木筷用于造纸，可为日本节省20%的造纸用木材，仅此一项，即可大体赚回进口木筷的资金。

三、水资源概况

1. 降水与水资源量构成

我国多年年平均降雨量为648mm（比世界年平均值800mm低20%），折合降水量约为61900亿m^3（1998年降雨量为713mm，折合降水总量67631m^3，均比常年值高11.3%）。降雨集中在夏季，雨区集中在东南沿海和长江流域。降水量中约56%消耗于蒸发，44%形成河川径流。

我国河川（地表水）径流量多年平均值为27000亿m^3（1998年因洪水河川径流量达32726亿m^3，比常年多24%）。

地下水是指降水和地表水体下渗后补给地下含水层的水量。扣除水面和矿化度大于2g/L的咸水水面后，我国地下水计算面积为944万km^2，全国地下水年平均资源量为8000亿m^3 1998年由于洪水，地下水资源量达9400亿m^3。

由于地表水和地下水都来自降雨，地下水又是由地表水转化而成，扣除重复部分，我国年平均水资源量为28000亿m^3（1998年由于洪水，全国水资源总量为34017亿m^3），列世界第六（前五位是巴西5.19万亿m^3；原苏联4.38万亿m^3；加拿大2.9万亿m^3；第四、五位的美国和印尼，水资源量和中国极为接近），人均水资源量仅2220m^3，是世界人均值的1/4，列世界第121位。中国的水资源量是全世界水资源量（约35万亿m^3）的8%，却要维持世界人口总数21.5%的人类活动，这是每个中国人都必须面对的事实。

我国流域面积在1000km^2以上的河流有5800多条，其总长度约42万km。河水流入海洋的外流河流域面积约占国土面积的65%，内陆河区域面积约为国土总面积的35%。

2. 河流

我国最著名的河流是：

长江。流入东海，长6300km，亚洲第一，世界第三（仅次于亚马孙河及尼罗河），集水面积（流域面积）180.85km^2，占全国国土面积的1/5，全流域年平均降雨量1000mm以上。据近40年资料，流入东海水量为：最丰年13728亿m^3（1954年，大通水文站记录）；近50年来，最枯水年7211亿m^3（1978年，大通水文站记录），多年平均值为9513亿m^3（大通水文站记录值为9334亿m^3），占全国河流入海总水量的37.7%以上。长江水量主要来自中上游，其中宜昌以上的上游河段河道长4500km以上，集水面积100.53万km^2，年均径流量4383亿m^3，占长江年均总流量的46%，宜昌至江西鄱阳湖湖口的中游段长955km，集水面积68万km^2，年均径流量4240亿m^3，占长江年均总流量的44%。长江全流域的汛期为4～10月份，中上游72.1%的水量集中在6～10月，最大洪峰出现在7～8月，历史上宜昌的最大洪峰流量是1870年（清同治九年），达100700m^3/s，1998年长江流域特大洪水时，8月16日宜昌洪峰流量为63600m^3/s。长江源头到入海口落差约为5400m，落差主要是在上游，宜宾以上河段（统称金沙江）长3464km，落差5100m，占全江落差的95%；从宜昌到入海口，河道长约1800km，落差仅50m。因此居世界第三的长江全流域的2.68亿kW的水力蕴藏量（仅次于刚果河和亚马孙河），有80%集中在宜昌以上的上游地区。表1-7为长江概况。

表 1-7 长江主要数据

数据名称	上游	中游	下游
起止位置	源头—宜昌	宜昌—鄱阳湖口	鄱阳湖口—入海口
河道长度，km	4504	955	938
流域面积，万 km^2	100	68	12
年均径流量，亿 m^3	4383	4240	890
（占总径流量的%）	46	45	9

注：资料引自李宪文等：《1998 大洪水百问》，水电出版社，1999。

黄河。全国第二大河，流入渤海，长 5464km，为亚洲第四、世界第七，流域面积 75.24 万 km^2。黄河年均径流量为 480 亿 m^3，仅是长江的 1/20，但年均输沙量为 16 亿 t，含沙量平均值 34.9kg/m^3，为世界第一，使河水水色浊黄，因而名为黄河。黄河的特点是历史上水患灾害多。从有文字记载的春秋时期（公元前 722 年～公元前 481 年）到公元 1949 年的 2000 多年中，下游决口 1500 多次，重要的改道 26 次，其中最重要并造成重大损失的改道 6 次为：

第一次，公元前 602 年（东周定王五年）；

第二次，公元 11 年（王莽新朝三年）在今河北大名决口并改道，水灾延续 60 年，直到公元 70 年才由王景领导数十万民工治好；

第三次，公元 1048 年（宋仁宗庆历八年）在今河南濮阳决口并改道；

第四次，公元 1128 年（宋高宗建元二年）夺淮河河道入海（在此前公元 1117 年，即宋徽宗政和七年，黄河河堤决口，淹死百万余人）；

第五次，公元 1546 年（明嘉靖三十五年）夺泗入淮；

第六次，公元 1855 年（清咸丰五年）在今河南兰考（兰阳）铜瓦厢决口，改道在今山东垦利县入海。

由于黄河每年 16 亿 t 的输沙量中有约 4 亿 t 在下游平坦的河段，致使河床高于地面 4～5m，甚至可高达 10m，形成“地上河”。

黑龙江。流入鄂霍次克海和日本海间的鞑靼海峡，长 4444km，亚洲第五，世界第九，流域面积 185.5 万 km^2，年均入海水量 3440 亿 m^3。黑龙江的水源主要来自夏秋季的降雨，全流域水力发电有相当潜力，目前开发程度有限。

珠江。珠江原指广州到虎门一段入海水道，现为西江、北江、东江的总称。珠江流入南海，长 2130km，列亚洲第六，世界第二十八，流域面积 35.5 万 km^2。珠江三角洲河网密布并由虎门、蕉门等 8 个口门流入南海。珠江水力蕴藏量的理论值为 0.33 亿 kW，占全国的 5.8%，仅次于长江及黄河，可开发的装机容量为 2485 万 kW。

塔里木河。为内陆河，流入罗布泊，塔里木河有三源：南源为和田河，其中游穿过塔克拉玛干沙漠，只在洪水期才有水流入塔里木河；西南源叶尔羌河是最长的支流；北源为源于天山的阿克苏河，水量丰富，是塔里木河的主要水源，从西南源的叶尔羌河河源到罗布泊全长 2179km。塔里木河的特点是河道摆动不定，洪水期则无固定河槽，在河谷洼地易形成湖泊。

松花江。源于长白山的天池，流入黑龙江，长 2308km，流域面积 55 万 km^2，径流量 780 亿 m^3，现有大小水库 1800 多座，蓄水能力 200 亿 m^3，已经建成 500kW 以上电站 46

座，总装机容量 186 万 kW，其中丰满水电站库容 107 亿 m^3，装机容量 55.4kW。

汉水。是长江最长的支流，发源于陕南，经湖北西部和中部在武汉市流入长江。汉水长 1577km，流域面积 15.9 万 km^2。汉水水资源丰富，尤其是汛期。为避免汛期洪水与长江洪峰相遇，在汉水上游的丹江口修建了丹江口水利枢纽工程，其中水库库容 209.8 亿 m^3，装机容量 90 万 kW。

辽河。流经河北、内蒙古、吉林和辽宁四省区，在辽东湾注入渤海，全长 1430km，流域面积 22.94 万 km^2，年径流量 150 亿 m^3。

淮河。发源于河南桐柏山北麓，流经河南、安徽、山东到江苏的洪泽湖，洪泽湖以上河长 845km，流域面积 16.4 万 km^2。由于历史上黄河改道，夺淮河下游河道入海，并造成淮河下游河道淤积，因此洪泽湖以下的淮河下游经三河、宝应湖、高邮湖在三江营汇入长江，至此淮河全长约 1000km，1956～1997 年，年均径流量 611 亿 m^3，流域面积 18.7 万 km^2。

20 世纪 80 年代以来，淮河各主要支流受到沿途工业废水的严重污染。20 世纪 90 年代初开始淮河 16 条主要支流中，半数河段的水质超过Ⅴ类标准，失去任何使用价值。1998 年 1 月 1 日，政府有关部门实施所谓“零点行动”，对限期内没有完成污水治理的企业“统一关停”；2000 年 1 月，政府有关部门认为“淮河干流化学需氧量（COD）基本符合Ⅲ类水质标准；主要支流的化学需氧量符合Ⅳ水质标准。2001 年 7 月下旬，淮河主要支流沙颖河普降暴雨，将沙颍河积累的 1.44 亿 m^3 的污水冲入淮河干流，出现“污染险情”。政府有关部门不得不发出“紧急通知”：对河南、安徽、山东三省原已“达标”的 100 家重点污染企业，紧急实行限产、限排或停产，“以防止发生重大污染事故”。

海河。狭义的海河是指从天津的金刚桥到流入渤海的入海口——大沽口的长 73km 的干流河道，广义的海河是是指永定河、子牙河、大清河及南、北运河等五条主要河流及 300 多条支流组成的海河水系，以发源于山西太行山的卫河算起全长 1090km。海河流域年均径流量为 404.1 亿 m^3，约为全国年均河川径流量的 1.5%，但海河流域的人口占全国人口的 10%，是人口、耕地、水资源最不均衡的地区，人均水资源量仅 340m^3，每亩耕地平均水资源量仅 240m^3，约为全国平均值的 1/6 及 1/8。另外，由于在太行山、燕山的河源与华北平原间落差较大，夏秋季雨量集中，因此海河流域有雨水灾，无雨旱灾。据史料记载，从 1368～1948 年的 580 年中海河流域发生严重水灾 387 次，严重旱灾 407 次。1939 年洪水冲毁津浦路，涌入天津市内，马路积水深 2m，市内行舟两个月。建国后对海河进行根治，在上游建大小水库 1900 多座，总库容 2665 亿 m^3，修堤防 4300km，水灾及旱灾频繁的局面得到控制。近年来，由于海河流域工业污水失控，全流域被污染河道总长达 3068km，占全流域河道总长的 51.6%，相当一部分河道已失去河流的功能。

雅鲁藏布江。全长 2057km，流域面积 24 万 km^2，流域平均海拔 4000m 以上，是世界最高的大河，年均流量 1654 亿 m^3，按流量计算，是我国第三大河。

3. 湖泊

我国地表水体面积在 1km^2 以上的湖泊约 2600 个，总蓄水量 7300 亿 m^3，其中约 1/3 是淡水湖。

我国最著名的湖泊是：

鄱阳湖。长江水系中最重要的湖泊，在江西境内，为我国第一大淡水湖，面积 3050km^2，枯水期仅 146km^2，最大水深 16m，容积 248.9 亿 m^3。近 40 年来，由于围垦和淤积湖面面积减小了 20%以上。

洞庭湖。长江水系中的另一重要湖泊，在湖南境内，原为我国第一大淡水湖，由于围垦和淤积，湖面逐渐减小，表 1－8 为 1825～1998 年洞庭湖湖面面积变化。

表 1－8　1825～1998 年洞庭湖湖面面积变化

年　　份	1825	1890	1932	1949	1960	1989	1998
面积，km^2	6000	5400	4700	4350	3141	2820①	2961

注：按湖面高程 34.5m 测算的湖面面积。

还要指出，昔日号称“八百里洞庭”原我国第一大淡水湖已分割成为许多大小湖泊，其调蓄洪水能力从 1949 年的 291 亿 m^3 减为 1998 年的 138 亿 m^3，水面幅度变化可达 13.6m。由于每年约有 1.28 亿 t 泥沙淤积湖底，洞庭湖与长江交汇的松滋、太平、藕池、调弦四口中的调弦已于 1958 年堵塞。由于围垦和淤积，每年损失湖面面积 15.8～21km^2。洞庭湖水系的湘、资、沅、澧等四水占长江水量的 21.6%，若洞庭湖的调蓄作用减弱或丧失，则洞庭湖水系及长江干流的洪水将给湖南带来更大的威胁。

太湖。在江苏境内，我国第三大淡水湖，面积 2425km^2，平均水深 2.1m，蓄水 27.2 亿 m^3。太湖水系共有大小湖泊 180 多个，连同进出湖泊的河流，所构成的河湖水网，有利于灌溉、航运及河湖水位调节。

洪泽湖。在江苏境内，古称富陵湖，原为浅水小湖群，1128 年黄河经泗水在淮阴以下夺淮河河道入海，失去入海水道的淮河，在江苏西部将原来小湖群扩大为洪泽湖，面积 2069km^2（按 12.5m 水位计），汛期按 16m 水位计，面积可达 2600km^2。洪泽湖流域面积 16 万 km^2，湖水最深 5.5m，蓄水能力 130 亿 m^3。

微山湖、昭阳湖、独山湖、南阳湖等“南四湖”。在山东境内，因四湖连通故称“南四湖”，总面积 1375km^2，其中微山湖面积最大，为 660km^2。

巢湖。在安徽境内，面积 800km^2。

滇池。在云南境内，我国西南地区第一大湖，湖面海拔 1886m，面积 370km^2，平均水深 5m，最大水深 8m。由于不合理的围垦使自古以来的“五百里滇池”面积缩小，而且由于附近的工业污染使水质变差，滇池的草海水域水质为超Ⅴ类，其外海为Ⅴ类，水体富营养化严重时有腥臭味。20 世纪 90 年代后期投入 70 多亿元进行治理。到 2001 年，治理未见明显效果。

4. 冰川

我国冰川总面积约 58500km^2，总储水量 51000 亿 m^3，年均融水量 560 亿 m^3，是我国西北和西南一些河流的重要补给来源。

5. 我国水资源分布的特点

空间分布不均衡。我国长江以北水系的流域面积占国土面积的 63.5%，水资源量仅占全国年均水资源量的 19%（另一种统计方法认为，淮河以北地区耕地面积占全国耕地面积的 62%，但河川径流量只占全国的 17%）。黄河、淮河、海河、辽河等四河流域的耕地面积占全国耕地面积的 42%，但河川径流量仅占全国的 8%，水资源量仅为全国的 9%。全国 8000 亿 m^3 的地下水资源，5000 亿 m^3 在南方，3000 亿 m^3 在北方，这种水土资源组合的不均匀给耕作制度的改进带来困难。

时间分布不均衡。降雨时间集中在夏季，降雨地区又集中在东南沿海及长江流域，使汛

期形成的洪水不仅无法利用，而且还造成灾害。在东北及华北，6～9 月的降雨量占全年降雨量的 60%～80%；全国多数河流 6～9 月的径流量约占全年的 60%～70%。若考察更大的时间尺度，则我国各地年降雨量的最大值与最小值的比值变化明显，在我国南方，年降雨量最大值与最小值的比值为 2～3，在北方为 3～5。由于降雨量在时间上的不均衡，使一些河流的径流量的最大值和最小值的差异明显。长江、珠江、松花江年径流量的最大值是最小值的 2～3 倍，黄河为 4 倍，淮河为 15 倍，海河甚至达 20 倍。年径流量的变化，使我国的河流，尤其是北方的河流往往出现连年枯水或连年丰水。例如黄河 1922～1932 年连续 11 年的年平均径流量比常年低 30%；松花江在近 80 年中出现过连续 11 年及连续 13 年的枯水期。1916～1928 年的年平均流量比正常年少 41%，而 1953～1966 年又比正常年多 41%。年降雨量及河流径流量的这种变化，使我国水旱灾害频繁，尤其是一些地区干旱严重。

人均水资源量分布不均衡。西南地区人口占全国的 1/5，水资源量占全国的 46%。雅鲁藏布江、怒江、澜沧江流域，土地面积占全国的 10%，人口占全国的 1.5%，耕地占全国的 1.7%，却拥有全国水资源的 21%。华北地区人口占全国的 1/3，水资源量仅占全国的 6%。西藏人均水资源 20 万 m^3/a，北京人均水资源约 $400m^3/a$，仅为全国人均值的 1/7，世界人均值的 1/28，上海人均水资源仅 $201m^3/a$，天津人均水资源 $153m^3/a$，在引滦济津工程完工前，枯水年份人均水资源仅 $20m^3/a$！人均水资源配置的如此不均衡对地区经济发展起了严重的制约作用。前已述及，我国的土地可能生产 8.3 亿 t 粮食，可能“承载”15.1～16.6 亿人口或“养活”21.1 亿人口，可能的问题不是没有土地，而是没有足够的水（图 1－1）！

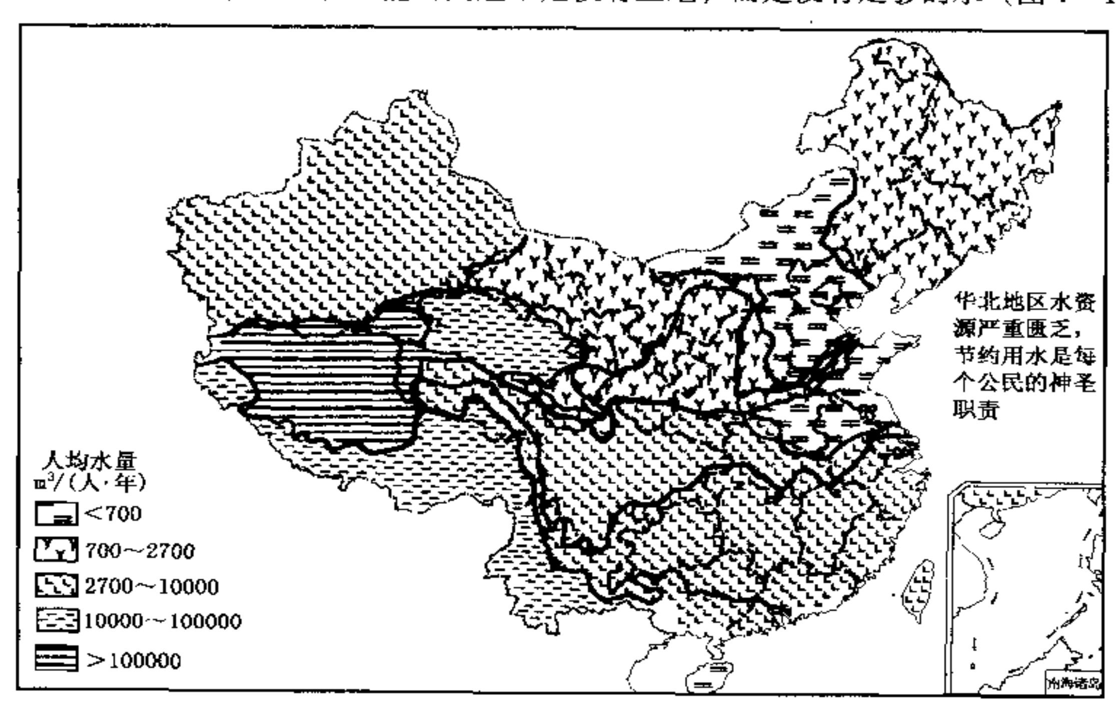


图 1－1　中国的水资源分布

（资料来源：中国地图出版社）

还应注意到，由于植被破坏等原因，全国年平均降雨量在递减（有资料认为以每年 12.7mm 的速率递减）。20 世纪 70 年代全国受旱面积为 1.7 亿亩，90 年代至少已发生 5 次

较大洪水，水灾发生呈加密趋势，同时受旱面积增加到4亿亩。目前全国还有3000多万农村人口及数千万头牲畜饮水困难，全国617个城市中有400多个供水不足。

6．我国水资源开发利用水平

可供开发的水资源量。我国虽有淡水资源2.8万亿m^3，但实际可供开发的仅有1万亿m^3左右，其中北方约2000亿m^3，南方约8000亿m^3。20世纪80年代末，水资源开发利用量为4700亿m^3/年，90年代末为5600亿m^3，2010年全国总需水量（在充分考虑节约用水的前提下）预计为6400～6700亿m^3，2030年全国人口进入高峰期，预计人口将达16亿人，人均水资源量将降低为1760m^3，接近世界通行的水资源紧张（人均1700m^3）标准，全年需水量将达7000～8000亿m^3。从理论上说，中国可供开发的水资源为1万亿m^3，还有潜力。但淡水资源的开发是有限度的，按国际上通行的标准，河流径流量可供开发的极限为径流量的40%。但我国一些河流，尤其是北方的一些河流，其开发程度已超过这一极限：黄河流域的开发程度已达径流量的58.6%，淮河及山东半岛地区则已达到76.8%。我国北方在20世纪90年代末的用水量已达2600亿m^3，由于河流水量不够，因此是靠超量掠夺地下水支撑地区的经济发展。例如北京每年开采地下水27亿m^3，由于长期超量开采，地下水面从1950年的－5m下降到1993年的－50m，2000年2月地下水位又比1998年降低7.2m，全市平原地区地下水平均埋藏深度降至13.65m，地下水储量累计减少36.86亿m^3。全市出现了2100km^2的漏斗区域，局部地区出现地表沉降，最大沉降幅度达60cm。

工业、农业及城镇生活用水比例。从20世纪80年代到90年代，我国工、农业及城镇生活用水量及比例见表1－9。

表1－9　我国工、农业及城镇生活用水量及比例

年份	农业用水（灌溉及农村生活用水），亿m^3（%）	工业用水（含发电）亿m^3（%）	城镇生活用水亿m^3（%）	年总用水量亿m^3（%）
1986	3900（88）	466（10.5）	68（1.5%）	4434（100）
1988	4189（88）	517①（12）		4706（100）
1992	4370（76.4）	926（16.2）	423（7.4）	5719（100）
2030	4530＋214（66.8）	1900（26.8）	456（6.4）	7100（100）

注：据刘昌明：《中国21世纪水方略》，科学出版社，1998.7。

①包括城镇居民生活用水。

从表1－9可见我国农业用水所占比例居高不下，即大量的水用于灌溉。农产品的价值一般低于工业品（据20世纪80年代中期对胜利油田所在的东营市的统计，油田万元工业产值耗水813m^3，地方工业万元产值耗水270m^3，万元农业产值耗水高达10260m^3），加上我国灌溉技术水平低，多采用渠道浇灌或漫灌，喷灌和滴灌的比例不高，到达农作物根部的水仅是用水量的30%～80%，平均值为40%，发达国家则已达到80%。我国每公斤粮食的用水量为1.23m^3，明显落后于世界先进水平（每公斤粮食用水量为0.7m^3）。

我国农业用水的比例居高不下（近75%，据2000年斯德哥尔摩国际水资源会议资料，世界平均水平为70%），而居民生活用水比例偏低（约5%～6%，世界平均水平为10%），说明我国经济发展程度并不高，用水结构也不够合理。与20世纪80年代美国的用水结构相比，工业用水占53%，农业用水占35%，居民生活用水占12%。我国水的重复利用率约

40%（发达国家为75%～85%），我国用水结构及水的重复利用还有很大的改进余地。

我国水资源开发利用水平。1998年我国万元国内生产总值耗水量683m³，万元工业（含火力发电）产值耗水量94～103m³（2000年降为91m³），是发达国家的5～10倍。城镇居民人均生活日用水量222L，折合每人年均用水量为81m³，仅是节水国日本20世纪70年代中期人均年用水量（110m³）的73%，是美国1980年人均用水量（300m³）的26%。虽然我国人均水资源量并不充沛，但居民节约用水的意识还相当淡薄。据德国乌帕塔尔环境保护研究所的调查，中国的人均日耗水量甚至高于德国！表1－10是中国部分大城市人均日用水量和德国及世界部分大城市的比较。

表1－10　中国部分大城市和国外部分城市人均日用水量的比较

城市或国家	北　京	天　津	深　圳	广　州	中国平均	德国平均
人均日用水量，L	197	298	375	515	222	127
城市或国家	巴　黎	多伦多	纽　约	巴西利亚	内罗毕	布拉格
人均日用水量，L	212	517	466	213	116	168

注：国外资料来源：联合国人居中心（内罗毕，1997年），数据为1993年资料。

从表1－10可见，现代化和文明程度远低于德国的中国，在节水意识上还有待提高。中国城镇居民节水意识不高的原因之一是：对水、对水资源是一种商品的认识薄弱，其表现形式之一是水价过低，表1－11是2000年年底我国部分大城市居民生活用水的价格。

表1－11　中国10个大城市居民生活用水价格

城　市	北京	上海	南京	杭州	合肥	大连	广州	珠海	深圳	重庆	武汉
水价 元/t	1.60	0.88	1.45	1.40	1.10	1.60	0.70	1.02	1.50	1.27	0.62

注：资料来源：国家统计局2001年4月的调查报告。

按居民人均年用水量为81t，每吨水价格为1元计算，每年用于生活用水的费用仅81元，占2000年城镇居民人均可支配收入（6280元）的1.3%。在城市，居民将用水视为一种福利；在农村，居民将水视为一种可无限使用的资源。这些观念都是使我国居民节水意识淡薄的重要原因。

黄河流域用水消耗量与水资源总量的比值为73.7%，海河流域为61.8%，淮河流域为34.9%，松辽平原各河流为16.6%（其中辽河为39.8%），珠江流域为14%，长江流域为12.1%，东南部地区各河流为9.9%，西南地区各河流1.3%，各内陆河流域为34.2%。应该注意按国际上的惯例河流径流量的开发极限是40%，我国黄、淮、海地区的多数河流已超过这一极限。

7．我国水污染概况

污水排放量。1980年我国污水排放量为304亿t，其中工业污水237亿t（占77%），城镇生活污水70亿t（占23%）；1989年污水排放量为353亿t，在十年间增加16%；1997年为584亿t，1998年为593亿t，其中工业废水占69%，生活污水占31%，从1989年到1998年的十年内排放量增加了68%。1999年，全国工业和城市生活污水排放量为401亿t，

2000年工业和城市污水排放总量为415.2亿t，其中工业污水194.2亿t（乡镇工业污水排放41.1亿t），生活污水排放总量220.9亿t。以上污水排放量是国家环境保护总局统计范围内的数据，若考虑到农村和沿海的各种污水排放，20世纪90年代末我国大体上每年排放污水600亿t，其中80%未经处理直接排入水域。我国城市污水处理率仅为15%，远低于发达国家的水平（85%）。像北京这样的大城市，每天产生污水约200万t，处理能力仅128万t，实际污水处理率仅40%。由于污水排放量大，全国七百多条重要河流，有50%的河段、90%以上的沿河水域被污染。污水排放量最大的河流依次是：

长江流域189亿t；珠江流域155亿t；松花江、辽河流域71亿t；海河流域55亿t；淮河流域47亿t；黄河流域32亿t；东南地区河流28亿t；内陆河流9亿t；西南地区各河流7亿t。

有12个省（市、区）的污水排放量超过20亿t。

主要河流水质。1998年对全国总长为109700km河道水质评价的结果见表1－12。

表1－12　全国主要河道不同类别水质所占比例

水质类别	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类	Ⅳ类	Ⅴ类	劣于Ⅴ类
所占比例，%	5.4	24.4	33	13.7	6.6	16.9

注：资料引自《1998年水环境公报》。

污染河道（水质为Ⅳ类以上）占37.2%。要说明的是由于1998年的大洪水，污染河道（水质为Ⅳ类以上）所占比例比枯水年1997年的43.6%（评价河道长度65405km）减少了6.4%，但仍占37.2%（评价河道长109700km）。各主要河流污染段长度所占比例见表1－13。

表1－13　各主要河流污染段长度所占比例

河流	淮河	海河	松花江、辽河	黄河	珠江	长江
污染段长度所占比例，%	76.6	74.8	64.6	62.7	17.4	14.7

从表1－13数据可见，淮河、海河、松花江、辽河、黄河被污染河道都在60%以上，是污染较重的河流；珠江已受污染，长江虽然接受污水量大，但因其径流量大，污染还算轻微。

四、海洋资源和环境概况

1. 海洋资源

我国海洋面积472.7万km^2，约为陆地面积的49.2%，从北向南依次为渤海、黄海、东海和南海。大陆海岸线长约18400km。海洋为土地不足提供了后备资源。建国以来围海造地近133万hm^2（2000万亩），沿海滩涂200万hm^2（3000万亩），是发展农业的基地。我国沿海水深15m以内的浅海面积为1233万hm^2（1.85亿亩），按现有的科技水平计算，可供发展养殖的浅海面积为246万hm^2（3700万亩），1997年实有的浅海养殖面积为34.8万hm^2（522万亩），仅为可供养殖面积的14%。我国沿海水深在15～30m的水域面积为0.196亿hm^2（2.95亿亩），水深200m以内的大陆架139.7万km^2（折合约20.95亿亩），是陆地面积的15%，这些地区都尚待开发。目前我国沿海已有吞吐量在万吨以上的港口80多个，拥有中级以上的泊位1446个，年吞吐能力为9.85亿t。沿海可建造大中型港口的岸

段还有200多处，其中30多处可建造5～10万t级的深水港口。

我国近海生物约1万种，其中鱼类约1500种，在中国沿海总面积约280万km^2的渔场，提供了海洋渔业90%的渔获量，近海和外海每年持续渔获量约753万t。其中渔获量最大的带鱼约50～60万t。

我国面积为139.7万km^2的大陆架上已发现7个大的含油气盆地，海洋石油资源量约250亿t，天然气资源量约8.4万亿m^3，已发现含油气构造100多个，已探明石油地质储量17亿t，天然气3500亿m^3，探明程度都还很低（石油：7%；天然气：4%），目前仅有20个油气田投入开发。除了油气资源外，海水中还有80多种元素。我国是世界海盐生产第一大国，有海盐田43万hm^2（645万亩），1997年海盐产量达2829万t。另外，海水几乎是无穷尽的资源，海水淡化对缓和沿海地区淡水资源短缺有重要意义，但我国海水利用的水平还不高，每年仅直接利用80亿m^3，主要用作工业冷却。

滨海地区还有旅游资源，我国沿海有1500多处旅游景点，但目前仅建成300多个旅游度假区。

2. *海洋污染*

1999年我国近海接纳工业废水36.8亿t，其中东海14.8亿t，南海9.2亿t，黄海7.1亿t，渤海5.6亿t。废水中化学需氧量（COD）111.1万t，占工业废水中化学需氧量排放总量的16.1%。

近年来，我国近海水域污染严重，海洋环境污染恶化的趋势还未有效控制。1999年对近海368个检测站点的检测结果是：没有被污染的Ⅰ类海水占14.7%，有轻度污染的、能进行海产养殖的Ⅱ类海水占28.5%，污染较重的Ⅲ类海水占10.3%，丧失使用功能的Ⅳ类海水占15%，劣于Ⅳ类的占31.5%。劣于Ⅳ类的海水所占比例已居首位。据国家海洋局发布的《2000年中国海洋环境质量公报》，2000年中国近海和近岸水域的水质与上年大体一致，水质劣于Ⅰ类的近海水域面积约20.6万km^2，约占近海海域面积的1/3。其中Ⅱ类水质的海域面积为10.2万km^2，Ⅲ类水质海域面积为5.4万km^2，Ⅳ类为2.1万km^2，水质劣于Ⅳ类的海域面积为2.9km^2。主要污染物是无机氮和活性磷酸盐；部分海域石油类污染物及化学需氧量超标，局部海域重金属铅超标。

东海海区劣于Ⅳ类的测点比例最高，达53%，其次为南海，劣于Ⅳ类的测点占34.7%，渤海占18.6%，黄海占18.2%。上海、浙江、广东近岸水域污染较重，山东、海南近岸水域水质较好（图1－2）。

海上油气田开发使含油污水的排放量增加，1999年含油污水排放量达3174.5万t，排放进海域中的石油类污染物总量达877.1万t。表1－14是1999年我国海上油气田含油污水排放情况。

近年来多发的赤潮是指海面上出现一层由夜光虫、甲藻（腰鞭毛虫）类生物的聚集，引起的海水变色，海面颜色发红的现象，是海洋受到污染的一种标志，也是一种重要的海洋灾害。赤潮作为一种海洋中的自然现象，早在千年前就有记载。近岸海域海水的有机物污染、富营养化是赤潮发生的重要原因。能引起海水变色、产生赤潮的微生物有约50余属、300种，其中约有70种能产生毒素；我国沿海有能产生赤潮的微生物约20属60余种。由于海水的富营养化和温度适宜，甲藻类生物的周期性大量繁殖，其新陈代谢产生的毒素释放到海水中，能使鱼类和其他海洋生物死亡。近岸赤潮海水中的毒素也会由于浪花飞溅而释放到空气中，影响人的呼吸系统。由于海洋污染日益严重，某些能形成赤潮的微生物繁殖极快，因

而在海洋中发生大面积赤潮。赤潮直接危害海洋动物的生存，并可能通过食物链影响人类的健康。

20 世纪 60 年代以前，我国海域很少见到赤潮，20 世纪 70 年代以前，有文字记载的赤潮仅 3 起，进入 20 世纪 80 年代后，由于大量增加的工业污水和生活污水排放进河流并最后进入海洋，使海洋发生赤潮的频度增加，1998 年我国沿海海域内发生过 22 次赤潮，使养殖的鱼、虾、贝类大量死亡，经济损失达 10 亿元。1999 年我国海域共记录到 15 次赤潮，其中 7 月 13～21 日发生的夜光藻赤潮面积达 6300km^2，持续 9d，是 20 世纪 90 年代以来我国沿海发生的最大的一次赤潮。据不完全统计，到 2000 年底，中国沿海发生过约 400 余起赤潮，所造成的鱼业和海产养殖业的直接经济损失约 400 亿元。

除了赤潮外，风暴潮、海难和油轮溢油事故也是重要的海洋灾难。仅 2000 年一年我国发生过较大的风暴潮 4 次，赤潮 28 次，海难事故 13 起，海上溢油 10 次。因各种海洋灾难死亡 79 人，受灾人口 1003 万人。

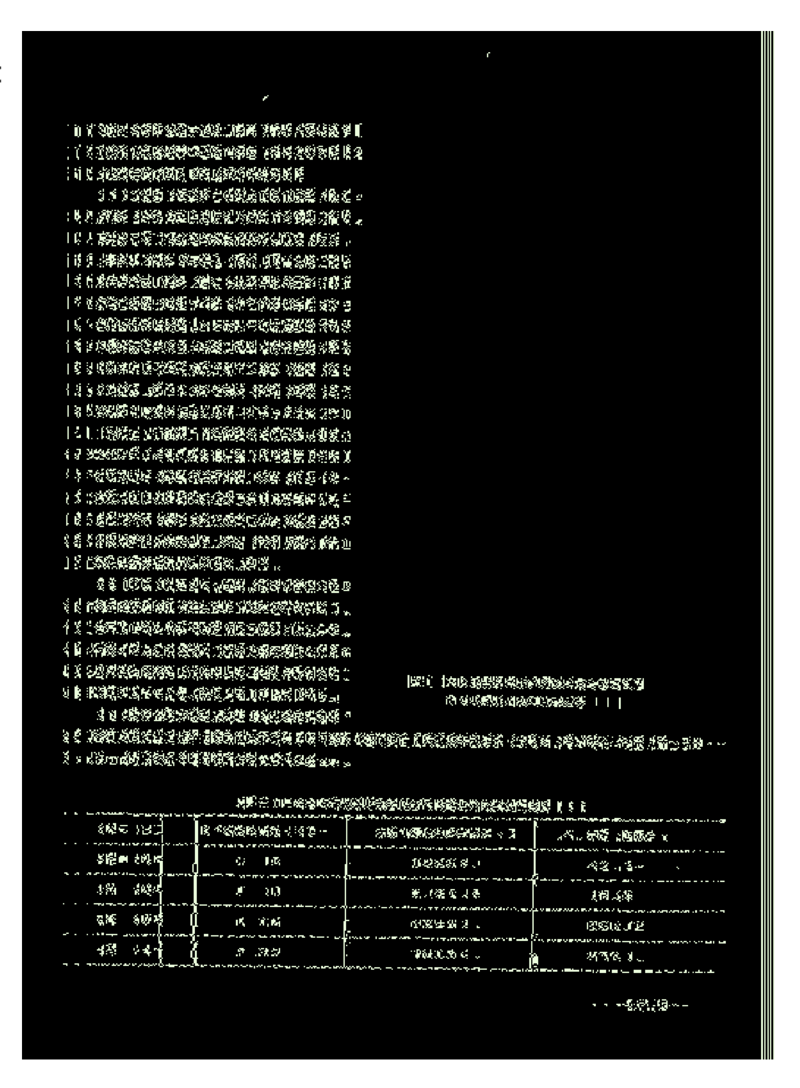


图 1-2　我国近海水域海水水质状况
（资料来源：国家海洋局）

由于全球气候变暖和地球旋转速率变化，和世界其他国家一样，我国海平面呈上升趋势，近 50 年来，每年平均上升 1～3mm，近年来，每年上升约 2.5mm。

表 1-14　1999 年我国海上油气田含油污水排放情况

海　　区	油气田数目，个	含油污水排放量，万 t	入海油量，万 t
渤　　海	8	204.4	42.3
东　　海	1	8.8	3.8
南　　海	16	2961.3	831.0
合　　计	25	3174.5	877.1

第三节　我国矿产资源勘探开发概况及生态环境问题

目前全世界可供开采的金属与非金属矿产资源约400余种，储量为1450万亿t，其中占开采总量85%的是能源资源（煤、石油、天然气、油页岩等）。每年应用能源的95%，工业原料的80%，及大部分农业生产资料（如矿物肥料等）都来自矿产资源。全世界每年开采矿产品约180亿t，其产值约占全世界国民经济总产值（GNP）的10%。全世界矿产品在国际贸易中的份额，在20世纪80年代约为40%，20世纪90年代由于信息技术等高技术产业的兴起，矿产品在全世界国际贸易中的份额降至30%左右；进入21世纪，由于一系列新材料代替矿产品，因而矿产品在世界国际贸易中的份额还将减少，但矿产品在世界经济中的重要性从未减少，目前全世界所需能源90%以上要靠矿产品（煤、石油、天然气、油页岩及铀矿石）。目前全球已探明的主要金属矿产资源可开采年限，多的约200年（铁：161～173年；铝：估计可开采年限为55～222年），少的不到50年（铜：33～48年；铅：18～64年；锌：20～50年）。对人类生活影响最明显的能源资源，据国内外专家估计，只有煤的储量比较充足，也由于目前的开采量不足，预计硬煤还可供开采140～180年，褐煤还可供开采180～220年。据德国鲁尔天然气公司估计，全世界天然气储量为135.5万亿m^3，按1999年的年产水平——22000亿m^3计算，还可开采60～70年。按美国埃索石油公司的乐观估计，目前世界已探明石油储量约为1380亿t，全世界目前有90万口采油井，年采石油约35亿t。按目前可能开发技术，石油的采收率可达到42%，考虑到石油价格的升高和今后开采技术的进步，采收率还可提高25%，加上勘探技术的进步，还可能再探明一些储量，据此计算，石油作为能源还可维持约40年。因此可预计21世纪社会和经济发展的重要制约因素将是自然资源短缺，尤其是矿产资源短缺。

一、我国矿产资源概况

到1996年底我国已查明2.3万个矿点和矿产地，发现了2万多处有工业开发价值的矿产地，发现各类矿产173种，探明储量的矿产资源达153种，其中能源矿产8种（煤、石油、天然气、油页岩、石煤、铀、钍、地热），金属矿产54种，非金属矿产88种，水气矿产3种。已探明储量的矿产资源中有36种（锌、铋、锑、钨、稀土金属、钒、钛、锂、硫铁矿、石墨、石膏、钴、锡、钼、汞、钽、煤、菱镁矿、萤石、磷、重晶石、石棉、砷、锰、铌、铅、硼）储量位居世界前列。45种主要矿产资源的折算价值（按矿产的价格、储量规模、品位、开采条件折算）为92.13万亿元，占世界矿产资源总价值767.75万亿元的12%，居世界第三位（仅次于美国和俄罗斯），但人均折算值仅为世界平均水平的58%，居世界第53位。

我国化石能源矿产丰富，煤炭资源量达5.05万亿t（根据1981年第二次全国煤田预测结果），其中埋藏深度在1800m以内的资源量为4.4万亿t，仅次于原苏联（6.8万亿t），高于美国（3.6万亿t），居世界第二位。另据《世界能源会议》“1989年能源资源调查”资料，美国实测煤炭储量为4305亿t，原苏联为2870万t，我国1988年详查和精查煤炭储量（与国外的实测煤炭储量相当）为3820亿t，仅次于美国，高于原苏联，居世界第二。我国的煤炭精查储量为2299亿t，与国外的实测可采储量相当，仅次于原苏联的2410亿t和美国的2406亿t，居世界第三。但我国能源结构中，煤炭比例在70%左右，还没有完成从以煤炭为主到以石油为主的转变，1996年采煤13.75亿t，为世界第一产煤大国。

据对我国 145 个盆地的油气资源评价，石油资源量约 940 亿 t（据《中国矿情》为 930.32 亿 t，南海南部资源量 152 亿 t 未计在内），预计可采储量 130～150 亿 t。目前已累计探明石油储量 180 亿 t（Ⅱ级，占总资源量的 19.5%），可采储量 55 亿 t（Ⅰ级），还有相当多的资源未被探明（Ⅳ级潜在资源量约占 12.1%；Ⅴ级推测资源量占 62.5%）。我国石油的需求量，2010 年预计为 2.0 亿 t，2020 年为 3.0 亿 t；预计产量为 2010 年 1.9 亿 t，2020 年为 2.0 亿 t。进入 21 世纪后，我国石油的供需矛盾将日益突出。

我国天然气资源量 38 万亿 m^3（据《中国矿情》为 37.92 万亿 m^3，南海南部资源量约 8.27 万亿 m^3 未计，若将南海南边的天然气资源计入则为 46.19 万亿 m^3），目前探明储量 1.52 万亿 m^3（Ⅰ级），约占总资源量的 4.4%，扩展储量（Ⅱ级）、预测储量（Ⅲ）占 3.3%，潜在资源量（Ⅳ级）占总资源量的 12.8%，推测资源量（Ⅴ级）占总资源量的 79.5%[1]。目前 90%以上的天然气资源尚未探明和发现，预计我国最终可采天然气资源量可达 10.5 万亿 m^3。我国天然气资源大部分在中西部，约为 22.14 万亿 m^3，占全国天然气资源量的 58.4%，其中中部地区（陕、甘、宁、四川、重庆）天然气资源量 11.36 万亿 m^3，西部地区（新疆、青海东部、河西走廊及阿拉善地区）天然气资源量 10.78 万亿 m^3，近海大陆架的天然气资源占全国的 22.1%。已探明的天然气储量中，四川盆地天然气储量为 3243 亿 m^3，松辽盆地 2365 亿 m^3，鄂尔多斯盆地 1363 亿 m^3，塔里木盆地 1032 亿 m^3（1996 年资料），准噶尔盆地 972 亿 m^3，柴达木盆地 580 亿 m^3，吐哈盆地 217 亿 m^3。1996 年底，西部的鄂尔多斯、塔里木、准噶尔、柴达木、吐哈盆地已探明天然气储量 4165m^3。1999 年在塔里木盆地西南部先后发现和田河气田（探明储量 620 亿 m^3）及盆地北部的克拉苏气田（探明储量 1856 亿 m^3）及依奇克里克气田（探明储量 1635 亿 m^3）。1999 年，塔里木盆地已探明储量、控制储量及预测储量（即Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级储量）已达 5679 亿 m^3。另外，1999 年在山西沁水盆地发现面积达 1768km^3 的煤层气田，已探明储量（Ⅰ级）474 亿 m^3，控制储量（Ⅱ级）446 亿 m^3。即使有这些发现，我国的天然气探明程度仍然很低（5%以下）。近年来，由于石油产量增长速度慢于对石油需求的增长速度，因此应加快天然气勘探开发的进程，使我国能源结构中天然气比例过低（3%左右）的局面能尽快改变。

二、我国矿产资源分布的特点

1. 矿产资源种类齐全配套

我国的矿产资源种类比较齐全，是世界上少有的各种重要矿产资源都有发现的国家。在世界上的 145 个国家中，探明储量的矿产资源在 36 种以上的仅有 7 个国家，中国即为其一；探明储量的矿产资源少于 5 种的有 55 个国家；探明储量的矿产资源为 6～15 种的有 50 个国家；探明储量的矿产资源为 16～25 种的有 30 个国家；探明测量的矿产资源为 26～35 种的有 3 个国家。中国探明矿产资源的种类达 153 种，是世界上矿产品种齐全配套的少数国家之一，而且某些矿藏还有明显的中国地质特点。例如白云鄂博稀土金属矿，已探明的工业储量是世界同类矿藏产量总和的 5 倍以上。再例如铅锌矿床，铅与锌的比例（Pb:Zn）国外一般是 1:1，甚至铅的含量还略高于锌。而我国一般能达到 1:2，甚至达 1:3～5。但是还有一些

---

[1] 我国石油天然气储量的命名和分类按世界石油大会的规定，按其可靠程度分为：探明储量（Ⅰ级），控制储量（Ⅱ级），预测储量（Ⅲ级）。这三级储量都是已被发现的资源；未被发现的资源分为潜在资源量（Ⅳ级）和推测资源量Ⅴ级）。

矿产资源，如铬、铂、钾盐，以及金、金刚石等探明储量远不能满足需要。

2. 共生、伴生矿床多

我国矿产资源的另一特点是共生、伴生矿床多，例如铁矿石中有15%为含钒钛磁铁矿，探明储量的硼矿中，60%为硼镁铁矿。全国已发现的铁矿中，25%是共生矿，40%的金矿、80%的金属矿都有多种矿产共生。有的金属矿，甚至有6～7种金属共生。这种状况有利于资源的综合开发和利用，可使一个矿变成几个矿，使矿产资源的增值明显。例如甘肃金川镍矿，从开始开采到1993年底，除生产了34.18万t镍外，还从共生矿中回收了13.65万t铜和8620kg铂族金属。但共生矿的开发、冶炼技术复杂，一次性投资较高，按现在某些乡镇企业粗放的开采经营方法，仅对其中一种矿产进行掠夺式的开采，其结果是导致资源的极大浪费。还要提到，共生矿的选矿技术复杂，这也制约了某些矿产资源的开发，例如内蒙的黄岗锡矿有铜矿和铁矿共生，因选矿技术复杂因而尚未开发。

3. 贫矿多，富矿少

我国相当多的矿产资源属于贫矿，例如铁矿储量的97.47%为贫矿，平均品位仅34%，比世界平均水平低10%，能直接入炉的富矿（品味在55%以上）只占探明储量的1.8%（澳洲、印度、巴西的大铁矿品位在60%以上）；锰矿中93.6%为贫矿，平均品位为22%，还不到世界锰矿商品标准（48%）的一半，品位高于30%的富矿不到探明储量的10%；铜矿中，品位低于1%的贫矿占65%，平均品位为0.87%，品位达到2%的仅占储量的6.45%；品位达30%（P_2O_5 含量）以上的富磷矿只占探明测量的8%以下；含硫量大于35%的硫铁矿仅占3.6%。中国也有一些矿产资源储量丰富，矿石品位高，在世界上有重要地位，如稀土（镧、铈、镨、铷、钐、铕、镝、钬、铒、铥、钇、镥、镱等16种元素）总保有储量9000万t，钛铁矿总保有储量3.57亿t，钨矿总保有储量529万t，锑矿总保有储量278万t，菱镁矿总保有储量30亿t，芒硝（Na_2SO_4）总保有储量105亿t，重晶石总保有储量3.6亿t，石墨总保有储量1.73亿t，硅灰石总保有储量1.32亿t，膨润土24.6亿t，均为世界第一。

4. 矿产资源分布不均衡

我国已探明储量的矿产资源分布不均衡：有色金属多在华南，煤、铁多在北方及西南，石油与天然气多在东北、华北、西北及西南，经济发达的长江及珠江流域化石燃料资源相对匮乏。另外，我国水资源和煤炭资源呈逆向分布。我国的煤炭资源主要分布在北方，而昆仑山—秦岭—大别山以北的17个省（市、自治区）的水资源量仅为全国水资源量的21.4%，晋、陕、内蒙、宁、甘、新省（自治区）拥有煤炭资源4.19万亿t，占全国的82.8%；埋藏深度浅于1000m的资源量为2.24亿t，占全国同样条件煤炭资源的83.8%；1996年年底保有储量7807亿t，占全国煤炭保有储量的77.9%。但是这些地区正是缺水地区，煤炭资源开发需要的工业用水（主要是煤炭选洗过程中的用水）及矿区民用水，必然会使用水量增加并可能导致这些地区本来就薄弱的生态环境进一步恶化，例如沙漠外延，植被破坏等。

5. 小矿多，大矿少

我国已探明的矿产资源中，有一些是大型或超大型的矿床，如陕西和内蒙交界处的神府东胜煤田已探明储量2236亿t（远景储量6000～10000亿t），为全国第一，是世界八大煤田之一。四川攀枝花铁钒钛共生矿，铁矿储量占全国的20%，钒储量占全国的87%，世界的20%，钛储量占全国的93%，世界的45%。另外，内蒙白云鄂博的稀土矿，湖南柿竹园钨矿，江西德兴铜矿，云南兰坪和甘肃西成地区的铅锌矿，辽宁海城的菱镁矿，黑龙江柳毛的

石墨矿都是大型或世界级的超大型矿床。但是在全国已探明储量的15000个矿床中，大矿仅占11%，中型矿床占23%，小矿占66%。例如全世界已发现储量大于200t的超大型金矿48个，这样规模的金矿我国一个也没有。

6. 人均矿产资源量少

我国矿产资源除稀土金属和钨的人均储量高于世界平均水平外，其余矿产资源的人均储量都低于世界平均水平，如煤的人均可采储量为101t，为世界人均水平（252.5t）的40%，约是原苏联的1/40，美国的1/7；人均石油地质储量45t，为世界人均水平（94t）的48%，为原苏联的1/30，美国的1/7；铁矿人均探明储量43t，为世界人均水平987t的49%，是加拿大的1/60，澳大利亚的1/80；铜为世界平均水平的29%，锡为70%以下；铝为33%以下；镍为29%以下。

三、我国矿产资源开发概况

1. 我国矿业开发的成就

建国以来，我国已建成近万个（9998个）国营矿山，另有集体及个体采矿点约27万个。1996年采掘矿石量50～60亿t，其中水泥和建筑用石灰岩21亿t以上，原煤13.75亿t，石油1.58亿t，天然气210亿m^3，铁矿石2.52亿t，钠盐2792万t。1996年矿产采选及相关能源与原材料加工的工业产值达20528.45亿元（其中矿产品采选业产值4148.37亿元），占乡及乡以上工业总产值（64887.81亿元）的31.64%。采矿业的总产值增加比上年增加18.28%。矿产品年出口额每年约110亿美元，进口额每年约273亿美元。到1999年，我国矿业生产总值已占国民生产总值（GNP）的4.4%，虽然由于信息产业等新兴产业的比重上升，但以矿产和矿产品为原料的加工产业仍占国民生产总值的27%。由于矿产资源的开发，支持了能源、原材料工业的发展并使之在我国国民经济中占举足轻重的地位。

建国以来我国已建成390多座以矿业开发为基础的城镇，80座矿业城市（矿业产值占城市工业产值10%以上，但京、津、沪、琼、藏、港、台地区除外）。其中大庆（黑龙江）、东营（山东）、攀枝花（四川）、白云鄂博（内蒙）、金川（甘肃）、锡铁山（青海）等12个城市都是由开发矿产资源起家的城市，其矿业产值占城市工业产值的70%以上。这些矿业城市供应全国76%的天然气，90%以上的石油和矿物原料。这些城市的兴起，也促进了地区的经济发展。

我国的矿业开发，使我国进入世界矿产资源大国、能源生产大国、矿产品生产大国的行列，提高了我国的国际地位。1996年我国原煤产量13.75亿t，占世界原煤总产量的29.85%，居世界第一；石油产量1.58亿t，占世界石油总产量的4.55%（1980年为3.56%），居世界第五；铁矿石产量25228万t，相应的钢产量达1.0003亿t，居世界第一；有色金属产量为523.10万t，居世界第二；黄金产量121t，居世界第五。中国部分矿产品出口在国际市场上有一定份额，这些都促进了我国国际地位的提高。

2. 我国矿业开发存在的问题

我国的矿产资源虽然丰富，但相当多的矿藏开发技术落后，回采率低，利用不合理。我国矿产资源的回采率比国外低10%～20%，采选回收率平均为30%～50%。其中煤炭资源回采率在50%以下，部分乡镇企业煤矿的资源回采率仅为10%。黑色金属矿的回采率为65%，其中铁矿的回采率为45%；10种有色金属的回采率为23%～72%，平均值仅50%。由于地方政府的纵容、失察或管理人员无能，目前全国有十万采金者，有上百座金矿在采金者的掠夺式开采中消失，每年有约十万两黄金去向不明。云南兰坪的铅锌矿藏，仅在凤凰山

$7km^2$ 的矿区内，就有 80 多个团伙，滥开矿洞 40 多处，每采 1t 矿石，浪费 7～8t 储量，到 1995 年已消耗储量 100 万 t，折合金属铅 1.2 万 t。在非金属矿藏的开采方面，技术水平低下更为明显：采选机械化程度不到 50%。绝大多数的乡镇企业矿山用人工开采、手工分选，机械化水平低，回收率低。以石材开采为例，采出的坏料（荒料）尺寸小，成材率小于 30%，即有 70%以上的石材资源浪费在产地。

我国的经济增长，至少在 20 世纪 50～80 年代，是依托于自然资源的过量消耗。1953～1986 年，我国国民收入增长 8.6 倍，而同期能源消耗增加 23.4 倍，四种有色金属消耗增加了 35 倍。我国单位国民生产产值的能耗是世界平均水平的 4.8 倍，钢材是世界平均水平的 3.6 倍，锌是世界平均水平的 2.7 倍，铅是 2.4 倍，铜是 2.2 倍。我国的能耗与日本接近，但国民生产总值仅是日本的 1/6。

我国还有部分矿产资源需要依靠进口，其中主要依靠进口的有：铬、钴、铂族元素、钾、金刚石等五类。到 2010 年部分需要进口的有石油、天然气、铁、锰、铜、镍、金、银、硼、硫铁矿等。到 2010 年可基本保证需要的有：铀、铅、锶、磷、石棉、耐火粘土；可保证国内需要，而且还可部分出口的有：煤、锌、钨、锡、钼、锑、稀土金属、菱铁矿、石膏、重晶石、滑石、钠盐、水泥原料、玻璃原料、石材、硅灰石、硅藻土等约 23 种。

四、矿业开发的生态环境问题

1. 土地资源的占用和破坏

矿业开发对土地资源的占用和破坏包括：矿产资源勘探过程的土地的占用和破坏；矿业及相应民用建筑占用土地；露天采矿场占用土地；矿业废渣类工业垃圾占用和污染土地；矿业地下开采造成地表塌陷、断裂等土地破坏；矿业开发的废水、废油污染土地。据对 173 家国有大中型矿山调查的数据推算，1994 年全国矿山开发占用土地 581.71 万 hm^2（港、澳、台未计），占全国土地面积的 0.61%，矿山生产而导致土地破坏的面积达 157 万 hm^2，占国土面积的 0.16%。我国煤矿以井下坑道开采为主，往往会造成地表的塌陷。据统计，地下每开采 1 万 t 原煤，地表将塌陷 $0.2km^2$，塌陷面积是煤层开采面积的 1.2 倍，地面的下沉值可达采出煤层厚度的 70%～80%。据不完全统计，到 1990 年底，我国因矿业开发而发生的地面塌陷已达 40 万 km^2，占国土面积的 4%。

由于地面塌陷可能导致地面建筑物、道路交通设施的破坏，地表自然状态、植被的破坏，地表耕地土壤营养成分及农田灌溉设施的破坏。在我国东部平原地区土地塌陷可能引起农田水淹或盐渍化；西部地区土地塌陷则会加剧水土流失或沙漠化。这些都将导致生态环境的变化。例如黑龙江的鸡西煤矿已有 70 余年开发历史，年产量约 3000 万 t，井田面积 $709.7km^2$，到 1996 年为止，矿区塌陷面积已达 $186km^2$，每年塌陷面积还在以 $5km^2$ 的速率在增加，占矿区井田面积的 26.2%。地面沉降深度为 0.1～4m，其中有一片面积为 $2km^2$ 的区域地面沉降深度超过 4.1m。由于地面塌陷，鸡西市区有 120 万 m^2（占塌陷地区全部建筑面积的 53.8%）的建筑设施受到破坏，公路受损路面面积达 37.8 万 m^2，有 22 座公路桥梁要重建。

2. 矿业废渣对环境的影响

矿业废渣主要指露天矿开采时剥离的土石，地下开采的煤矸石和其他固体矿产的夹石、废石，以及选矿过程中产生的尾矿等。矿业产生的固体废弃物占全国每年产生的固体废弃物总量的 70%。1983 年年底，全国各类固体废渣累计存量已达 60 亿 t，其中最多的是煤矸石，累计达 30 亿 t，而且每年还要增加 1.5～2 亿 t。我国金属矿山（铁矿另计）多为露天开采，

每年剥离土石 2～2.6 亿 t，1997 年全国各类金属矿的废矿渣及尾矿存量已达 40 亿 t。铁矿矿石每年生产 1 亿 t 以上，并形成 3 亿 t 废渣及几千万 t 选矿后产生的尾矿。1993 年底我国各类固体废渣占地 5 万 hm^2；到 1996 年底，仅 30 亿 t 堆积煤矸石就占地 8000hm^2。

废矿渣的堆积占用了大量土地，其中大量是宜耕良田。如唐山地区大中型铁矿开发占地 5280.6hm^2，其中露天开采矿区占地 1127.8hm^2，排石场占地 1939.3hm^2，尾矿场占地 650.2hm^2。铁矿开采破坏耕地 1357.9hm^2，林地 490.5hm^2，草地 47.8hm^2。

矿业废渣还会破坏植被，破坏自然景观。各种金属矿的尾矿往往磨得很细，容易因风扬而污染空气，还可能使土地沙化，破坏植被，还可能使牧草产生毒性，危害牲畜；如流入地表水体或渗入地下水，还可能造成水污染。

矿山开采的废渣和尾矿有可能综合利用。例如云南锡业公司有 28 个尾矿库、35 座尾矿坝，累计堆放尾矿 1 亿多 t，其中含锡 20 多万 t。安徽铜官山铜矿的响水冲尾矿库从 1952 年到 1967 年共堆存尾矿 860 万 t，尾矿平均含硫 5.82%，含铁 28.73%。辽宁建昌八家子铅锌矿从 1969 年投产以来，到 1990 年为止，已堆存尾矿 260 万 t，尾矿含银（Ag）：69.94g/t，硫（S）：2.335%，铅（Pb）：0.19%，锌（Zn）：0.187%，铜（Cu）：0.27%。四川攀枝花铁矿年产铁矿石 1350 万 t，所产铁的价值仅占矿石总价值的 38%，从尾矿中综合回收的钒、钴、钛、钪等精矿产品价值甚至超过铁的价值，达到总价值的 62%。对尾矿除了回收其有用成分外，还可以用作铺路材料、井下充填材料，有的还可用于生产水泥、玻璃，还可以制砖等。

3. 矿业废水对环境的影响

矿业废水包括矿坑排水、选矿尾水、钻井废水（钻井液及洗井液）、采油废水（采油过程中经油水分离后的污水及人工注水过程中排放的污水）、炼油厂废水以及井喷事故、海上油田及油船泄漏排放的石油或石油制品等。

据统计，仅国营煤矿每年排放矿井水 22 亿 t。另有资料表明，我国华北地区，每采出 1t 煤，要破坏 10t 地下水。铁矿区的废水以唐山地区国营大中型铁矿为例，每年排放矿坑水 616.12 万 t，洗矿和选矿废水 1934.2 万 t。据原中国石油天然气总公司统计，1996 年该公司系统采油厂废水排放量为 3690 万 t，炼油厂废水 2360 万 t，钻井污水 588 万 t，石油企业机加工污水 1112.87 万 t，此外每年还有 10 万 t“落地油”，这些污水或污液，大部分都以各种渠道进入地表水体。另据国外研究，每年石油产量的 2% 以各种形式（油船泄漏或油船压仓水、石油工业污水、动力设备燃烧不完善）进入水体。

目前我国石油污水处理的水平还不高，采油场污水处理的达标率为 44.6%，钻井污水排放达标率仅为 8.8%，炼油厂污水排放达标率为 82%，石油机加工废水处理率仅 55.63%。此外，一些油田开采的稠油密度大（940kg/m^3），开采方式特异（注蒸汽吞吐法），污水很难处理。我国近海水域石油类污染物超标（0.05mg/L）区域达 12 万 km^2，其中渤海湾超标区域 4 万 km^2 以上，约为渤海湾面积的一半。

金属矿的废水含有某些对生物有害的元素，排入水体，会使水变色，而且水质恶化，除不能饮用外，还会使鱼类及水中浮游生物灭绝。煤矿废水中含有大量很细的煤粉，往往会形成煤泥和煤泥水，大量排放或外泄时，会污染水体，堵塞地下管道或河道。石油污水则会改变自然景观，影响水中植物的光合作用及动物的呼吸，大量的石油泄漏往往会使污染区生物灭绝。非金属矿的废水主要是固体悬浮物废水及酸碱性废水。

4. 废气对环境的影响

矿区的空气污染主要是矿井排风，煤矿井巷坑道中的有害气体（瓦斯）抽放，油田及炼油厂石油尾气的放空，各种锅炉、窑炉、自燃煤矸石、民用燃煤灶排出的废气，金属及非金属矿产品加工厂（场）排出的废气，以及煤矿、金属及非金属矿生产和加工运输过程中产生的粉尘等。由于规划和管理方面的问题，煤田自燃每年要消耗大量煤炭资源，如宁夏汝其沟煤矿每年有 100 万 t 以上优质无烟煤被烧掉，新疆小黄山煤田由于自燃已累计烧掉煤炭 6760 万 t。

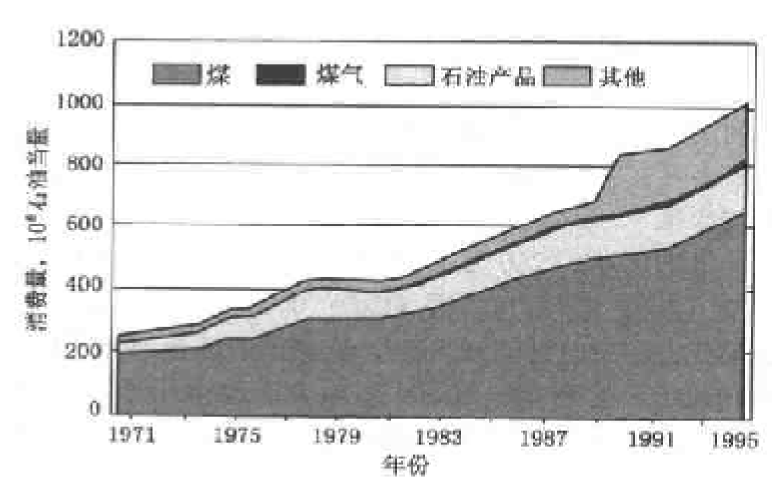


图 1－3　1971～1995 年中国的能源结构

（引自《世界资源报告（1998～1999）》，中国环境科学出版社，1999 年）

煤是我国的主要能源，煤炭年产量的 84％又用作燃料，因此燃煤引起的煤烟污染是我国大气污染的主要原因。据中国煤炭学会的资料，全国煤炭系统由于燃煤每年排入大气中的废气达 1700 亿 m^3，烟尘 30 万 t 以上，SO_2 排放量超过 32 万 t。由于煤炭燃烧不完善，因此空气中总悬浮颗粒物中，有 80％来自燃煤，全国各大城市空气中悬浮颗粒物的日均值比世界卫生组织规定的人体健康标准高 3～5 倍。1997 年世界卫生组织（WHO）公布的世界空气污染最严重的城市中，中国占六个（太原、济南、沈阳、北京、重庆、上海），1998 年增加到八个（太原、北京、乌鲁木齐、兰州、重庆、济南、石家庄、沈阳），因此联合国环境规划署、开发计划署、世界银行、世界资源研究所编写的《1998～1999 世界资源报告（全球环境指南）》认为“中国的空气污染属世界之最”。由于中国煤炭资源中含硫量较高，尤其是西南地区煤炭中平均含硫量为 2.69％，该区还有未利用高硫煤储量 432 亿 t，占全国高硫煤储量的 35％，占西南地区煤炭测量的 56.7％，仅重庆市每年就消耗高硫煤 1300 万 t。由于空气中 SO_2 含量高（90％来自燃煤），因此在我国的西南、华南、华中地区出现酸雨（pH 值小于 5.6）区，而且酸雨区还在扩大。由于燃煤和石油及石油制品的使用，空气中 CO_2 含量增加，并导致温室效应日趋明显，仅由于燃煤而产生的 CO_2，年增长率为 3％～5％（图 1－3、图 1－4）。

井下采煤产生的大量粉尘，成为矿工矽肺病的重要诱发因素，据不完全统计，煤炭行业现有矽肺病患者 40 万人，而且还以每年 8000 余人的速度增加。另外，非金属矿开采中产生的石棉纤维和硅灰石粉尘是引起石棉肺病和癌症的重要原因。据对 16 家主要石棉制品企业调查，患各期石棉肺病的患者占职工总数的 10.6％，其中癌变者占（总数）1.1％，污染最严重的企业，职工患病者占职工总数的 27.4％。

5. 地质灾害及其他生态环境问题（塌陷、火灾、瓦斯、噪声……）

矿业开发除了会引起前已述及的塌陷外，瓦斯爆炸、矿井火灾时有发生。我国煤矿矿井中有 47％属高瓦斯或瓦斯突出的矿井。据统计，一次死亡 10 人以上的特大事故，每年约有 70 起，仅 1995 年就发生过 311 起因瓦斯爆炸或与瓦斯有关的伤亡事故，死亡 2132 人，事

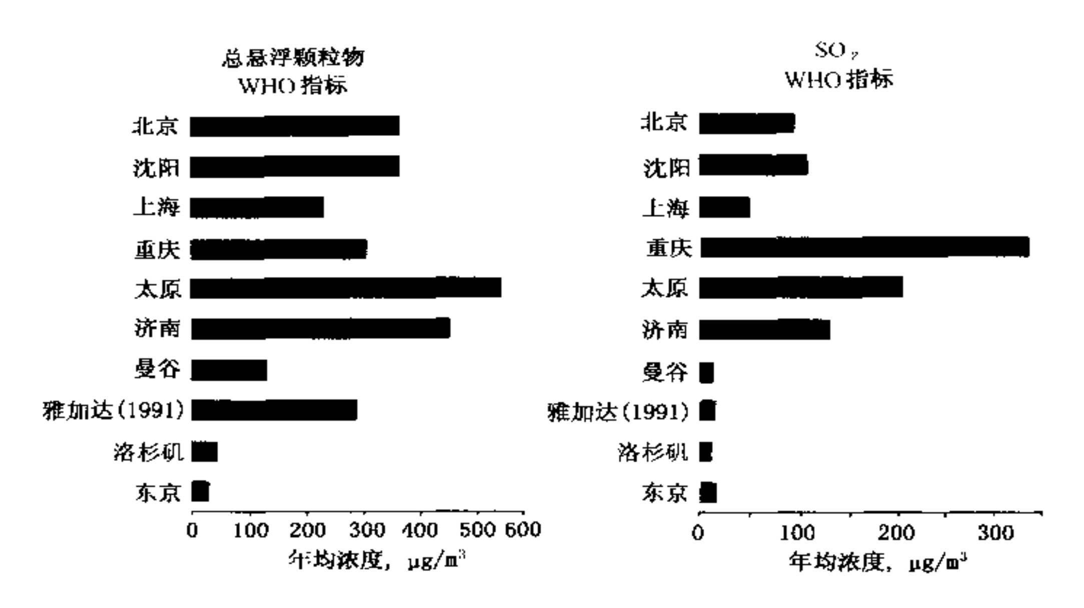


图1-4 中国及世界若干大城市的大气污染

（引自《世界资源报告（1998~1999）》，中国环境科学出版社，1999年）

故发生次数占煤矿重大事故的65.6%，死亡人数占当年煤矿事故死亡人数的71.5%。煤矿中另一隐患是火灾。据1993年对84个矿务局621个煤矿的鉴定结果认定，有361个矿井（占鉴定井数的54.9%）有自燃发火的危险。1953~1988年，全国国营煤矿每年平均发生火灾300多次，每年因此损失的煤炭产量约120万t。

由于煤矿的井下工作环境恶劣，1995年全国重点煤矿百万吨死亡率为1.17，地方国营煤矿为4.89，乡镇集体煤矿为（不完全统计）8.45，远高于世界的其他主要产煤国家。2001年4月1日至5月16日，全国煤矿发生一次死亡3人以上的重大事故62起（其中瓦斯爆炸事故居多），共死亡503人。发生事故的煤矿多是小矿，相当一部分由个人承包，这些矿井不具备基本的安全生产条件。表1-15为世界重要产煤国家的百万吨死亡率。

表1-15 重要产煤国的百万吨死亡率

美国（1994年）	英国（1994年）	日本（1994年）	南非（1993年）	波兰（1994年）	印度（1994年）	俄罗斯（1993年）
0.05	0.12	0.15	0.25	0.25	0.53	0.96

注：资料引自《中国矿情》，2000年。

另据《时事资料手册》2001年第2期报道：主要产煤国百万吨死亡率为：

美国：0.04（38人/9.6亿t）；俄罗斯：0.66（172人/2.6亿t）；印度：0.46（132人/2.9亿t）；中国：7.29（10015人/13.74亿t，1996年）。

地下井巷坑道中的采矿作业，由于工作面小，高噪声设备密度大，使噪声集中、叠加，所用设备有的噪声水平相当高，如空气压缩机，噪声达102~130dB，风动凿岩机为115~130dB。目前使用的降低噪声的设备的作用有限，甚至对矿区的噪声检测都还没有系统的资料。

在铀矿等放射性矿山，还有放射性辐射污染问题，而且品位越高的矿床，各种辐射污染

越严重。在放射性矿物的开采、加工、运输过程中，还可能产生放射性矿尘和气溶胶。有资料表明放射性矿山排风井及其他污染源对大气的影响范围约为100～200m，因此污染源和生活设施应有足够的安全距离。

小　结

本章介绍了世界的资源与环境概况，以下仅对中国资源问题的特点及对生态环境的影响作简单小结：

1. 由于人口众多，使中国人均主要自然资源量在世界平均值以下（表1－16）

表1－16　中国主要自然资源的人均值与世界平均值的比较

资源种类	耕地	森林	淡水	矿产总值	煤	石油	铁	铜	铝	镍
为世界人均值的	0.43	0.16	0.25	0.58	0.40	0.48	0.49	0.29	0.33	0.29

注：另据世界银行的资料表明：1996年我国的国民生产总值（GNP）为美国的1/7，人均GNP值为美国的1/43。

2. 资源结构不理想，分布不均衡

土地资源中，难于利用的部分总面积达293万km^2（其中流动沙丘45万km^2，戈壁55万km^2，海拔4000m以上的山地193万km^2），占国土面积的30.7%。矿产资源中贫矿多，富矿少，难于开发利用的共生矿多。水资源分布在时间、空间上差异明显，耕地多的区域水少，重要能源和金属矿产地水资源少。这些特点对地区经济发展和生态环境有明显的影响。

3. 资源利用率不高，利用不够合理

主要矿产资源的回采率多在50%左右；资源的再生利用率低，我国钢铁的再生利用率仅46%～47%，世界上发达国家的平均水平是70%；有色金属的再生利用率，发达国家是接近70%，我国仅达30%；废纸利用率发达国家已达到80%，我国仅为20%；玻璃的再生利用率，世界上已达到50%，我国仅10%。“民殷国富，而不知存恤”尚属失策，甚至失国，竭泽而渔者，或可利在当代，但其后果必是罪在千秋。

4. 能源结构中煤炭所占比例过高

我国能源消费结构中，煤所占比例在70%左右，石油约为20%，天然气仅占2%，其他（水力发电、核电站等，生物燃料未计）3%。中国每年要消耗约10亿t煤，其中工业用煤约占2/3，仅工业锅炉一项就消耗每年总用煤量的30%，这些工业锅炉通常热效率低，因此烟尘、SO_2排放量居高不下。由于能源结构中煤炭的比例过高以及每年使用的绝对数量大，因此燃煤所造成的空气污染（与之相关的还有酸雨区扩大等问题）已是我国环境污染中最为严重的问题之一。

5. 环境意识淡薄

新中国建国以来，由于有三次社会经济发展决策方面大的失误（批判“新人口论”；“大跃进”；“文化大革命”），致使中国的社会和经济发展遭到严重挫折，尤其是人口压力膨胀，生态环境脆弱，目前中国已经开始意识到可持续发展问题，但在经济建设方面，急于求成，片面的以为增长就是发展观念仍然有相当影响。列为基本国策的环境保护的投人，到上世纪90年代仅占国民生产总值（GNP）的1%以下，2000年环境污染治理的投入为1060.7亿元，仅占当年国内生产总值（GNP）的1.1%。有限的投人主要安排在大城市，而严重浪费

资源、能源、管理失范的乡镇企业造成环境污染，甚至发生重大恶性事故，危害生态环境的状况，并没有得到改善。将来从历史上看，目前的乡镇企业，很可能是“功在当代，罪在千秋”的样板。

思考题

（1）我国乡镇企业对我国生态环境的影响。

（2）我国经济发展与世界生态环境、我国生态环境的关系。

第二章　生态环境问题的研究领域

第一节　生态环境问题

一、生态环境问题

生态环境问题按成因可分为两类：一类是由地震、洪涝、飓风、海啸、火山爆发等自然灾害和成因产生的并且目前科学技术还不能完全解决的生态环境变化和灾害的预测和防治问题。另一类是人类活动引起的生态环境问题，即环境污染和生态平衡破坏。环境污染是开发利用自然资源时产生的废弃物（工业废气、废水和固体废弃物等"三废"）使大气、水体、土壤和生物性态改变、受到污染。此外还包括人类活动引起的声、热、放射性和电磁辐射污染。环境污染的重要原因是对工业品，尤其是化学制品的使用。目前已有约1200万种合成的新化合物，化工产品超过7万种，产值约1万亿美元（中国约为5000亿人民币）。1950年世界有机化学产品为700万t，1970年为6300万t，1985年为2.5亿t（估计）。世界塑料年产量达1亿t，其中约有5%在使用当年就作为废弃物排放。我国推广地膜覆盖面积达7000万亩，塑料薄膜用量达30万t，废弃的农用薄膜已形成"白色污染"。目前，全世界每年消耗7亿t钢铁、1300万t铝、700万t铜，能源消费则在90亿t石油当量以上，其他非金属材料的产量和消费量更大。因此，每年产生450亿t垃圾，其中有害废弃物2.5～6亿t。目前对垃圾还没有完善的处理办法，填埋不当或焚烧都会产生二次污染（近年来，随着因特网的发展，出现了信息污染，从而使环境污染概念超出了传统的范围。但此类污染暂不在本书讨论范围之内）。生态平衡的破坏是指由于自然界演化和人类活动引起的自然生态系统的变化。例如，全球气候变暖引起的海平面上升，砍伐森林、植被减少引起气候变化和水土流失，过度放牧和大面积开垦草原引起的草原退化、荒漠化和生物物种变化，滥猎滥捕使生物多样性遭到破坏、珍稀物种灭绝等。与环境污染相比，生态平衡的破坏是在时间尺度上较缓慢的过程。

战争是引起生态环境变化的重要因素。历次战争都造成植被、森林和地形地貌毁灭性破坏以及地表沙漠化等。越南战争中使用化学武器、枯叶剂和除草剂，使生态系统显著变坏。1991年，一支登山队在珠穆朗玛峰看到黑色雪花。黑雪的原因是1990年的海湾战争。这场战争共耗用1.8万t炸药。仅科威特就有700多口油井燃烧，有的持续燃烧了8个月，最多烧掉80万t/d原油，除每小时排放约1900t二氧化碳外，燃烧后出现大量尘埃弥漫，经印度洋上空的暖湿气流东移，飘过喜马拉雅山上空时凝成黑雪落下。黑雪迅速吸收太阳辐射，使冰雪融化，河水暴涨，成为洪灾的祸源。

二、生态环境问题的历史回顾

地球的寿命约50亿年，智人的出现，约在2～3百万年前。史前时期，生产力水平低下，人类对自然力更多的是膜拜，有意识地改变环境的能力有限，对生态环境的影响和干预甚微。

约1万年前，人类开始驯化动物和栽种植物，出现早期的畜牧业和农业而进入农耕社会。此后，森林减少、河流泛滥、气候干旱等生态环境问题开始出现。但此时人类活动引起

的生态环境变化还是在人类和自然界可承受的范围内。

生态环境的明显变化是从工业革命开始的。最早是英国的空气污染：伦敦早在13世纪就使用煤炭，使街道到处煤烟、灰尘滚滚，并采用煤渣灰浆制造砖瓦；1709年，开始用焦炭炼铁，随后煤炭还作为蒸汽机的燃料，成为主要能源，使人类进入工业社会。人类在利用自然资源能力增强、生活质量改善的同时，也带来了环境污染和生态环境破坏问题。工业发展造成的环境污染，其规模和影响，为前所未有。

工业革命陆续建立了纺织、煤炭、钢铁、化工等产业。伴随煤炭作为动力的应用，产生大量煤烟粉尘和硫氧化合物，污染了空气。化学工业产生的氯化氢排入大气，弃置的硫化石灰分解产生硫化氢，制造水泥产生的粉尘，造纸工业的废液，塑料、染料、炸药、石油和酸碱精制过程中产生的大量废酸和废碱对生态环境构成威胁。

20世纪20年代以来，石油和天然气的产量迅速增长，在能源结构中的比例明显上升。使用内燃机的汽车、拖拉机、机车、动力设备使汽油、煤油和轻柴油的消耗量激增，用重油作燃料的锅炉广泛使用，使石油制品及其燃烧产物造成的污染日趋严重，典型事例是美国洛杉矶光化学烟雾事件。从1943年开始，在洛杉矶上空出现了刺激性很强的浅蓝色光化学烟雾，其中含臭氧、氧化氮、乙醛及其他氧化剂，这些污染物主要是汽车排放的废气在太阳光辐射作用下产生，对人体和家畜造成危害，妨碍农作物和植物的生长，腐蚀材料和建筑物，使橡胶制品老化，降低大气的能见度，影响汽车和飞机运行的安全。20世纪50年代至60年代，日本由于连续发生严重的污染事件，一度被称为“公害列岛”（由日本人“发明”的“公害”一词，其含义似与“公益”相对。但对“公害”中“公”的概念究竟是从几个人算起？“害”是属于影响生活、生存环境本身，还是影响社会生活秩序。如各种事故造成交通堵塞，是属于刑事责任还是民事责任？均无界定，因此本书一般不采用“公害”的说法，而采用环境污染、生态环境破坏这样一些概念更准确的术语），街道空气污染严重，街头曾出现清洁空气出售站。

20世纪前期，煤虽然在能源结构中的比例下降，但其消耗量未减，致使煤烟尘和SO_2的污染与日剧增。1930年比利时的马斯河河谷事件和1948年美国的多诺拉事件是典型例证。比利时马斯河两侧高山矗立，炼焦、炼钢、电力、玻璃、炼锌、硫酸、化肥厂等重工业企业沿24km长的河谷分布。1903年12月1日至5日，工厂排出的有害气体和被粉尘污染的空气积聚不散，一周内造成60多人和大批家畜死亡。1948年10月，在美国宾夕法尼亚州的小镇多诺拉，因炼锌厂、钢铁厂、硫酸厂等工厂排出SO_2等有害气体和粉尘蓄积在山谷地带中不能及时扩散，使当地居民的43%，即约6000人患病，50余人死亡。1952年12月5日，英国伦敦发生烟雾事件，由于燃煤产生的烟雾，致使4天中死亡人数较常年同期多了4000人。当时未找出原因而没有采取有力的防治措施，1956年、1957年和1962年又连续发生严重烟雾事件。此后发现煤烟粉尘中有在潮湿空气中能促使二氧化硫生成硫酸泡沫的三氧化二铁，生成的硫酸呈雾状附着烟尘上，进入人的呼吸系统后，使人发病并加速慢性病患者的死亡。

第二次世界大战后20多年，石油的消费持续增长。20世纪60年代，世界石油年产量从10亿t增至21亿t，煤炭年产量从20亿t增加至25亿t。随之而来的是大气中SO_2的含量急剧增加。洛杉矶型光化学烟雾事件，在世界大城市时有发生。地区性环境污染造成的地方病，危及公众健康，甚至生命的事件多有报道。

20世纪后期，出现了放射性污染、农药等有机合成化学物污染、海洋石油污染等新污

染。随有机化学工业发展，含有机毒物的废水对水域和渔业生产的破坏日益突出，海洋石油污染和泄漏的事故时有发生。

环境污染最早发生在美国、日本等发达国家。20世纪60年代末以来，这些国家开始重视环境污染的治理，生态环境得到改善。但生态环境问题被发达国家转移到发展中国家，生态环境问题成为全球范围的问题。19世纪后期，英国研制成功有机水银农药，1910年英国、欧洲各地开始生产含有机水银的农药后，发生了多起有机水银中毒事件。发达工业国禁止使用有毒化学物质后，便向尚未限制的国家或发展中国家输出有毒产品或生产技术，致使输入国产生中毒事件。1984年12月3日凌晨，印度中部博帕尔市北郊的美国联合碳化物公司的农药厂发生异氰酸甲酯剧毒气体泄露，30t毒气化作浓烟雾以5km/h的速度弥漫。只要有极少量毒气短时间在空气中停留，就会使人感到眼睛疼痛，若浓度稍大，会使人窒息。到1984年底，该地区有2万多人死亡，20万人受到波及，附近的3000头牲畜遭难。在侥幸逃生的受害者中，孕妇大多流产或产下死婴，有5万人可能永久失明或终生残疾。美国本土的这类工厂都设有先进的电脑报警装置，并远离人口稠密区，而博帕尔农药厂只有一般的安全措施，周围有成千上万的居民。博帕尔事件是发达国家将高污染及高危害企业向发展中国家转移、导致环境污染扩散的典型案例。

20世纪70年代中叶以来，全球的温室效应、臭氧层破坏、酸雨、赤潮、局部生态环境恶化等，已成为人类共同面临的威胁。随着世界城市化进程，城市成为人类活动的中心。但由于城市建筑规划布局不合理、色彩不和谐，玻璃墙幕的阳光反射及各种杂乱无章的路标、广告、蜘蛛网似的电线、电话线以及工业噪声、交通噪声和社会生活噪声，使人的生理和心理受到更多的不良刺激。

现代信息技术在颇大程度上改变了人类对经济发展的理解和认识，可以更有效实现信息的流动，促进经济发展和社会进步。但和任何新技术一样，信息技术在带来方便的同时，也带来了新的问题。尽管信息技术是“清洁工业”、“后工业”的代表，但也承袭了传统工业的弊端。例如，计算机“芯片”所用的硅片需要达到相当高的纯净度，而从石英矿砂开始的硅净化过程需要使用大量的原料和有毒化学制品。一台个人计算机需要700多种原材料，含有许多有毒物质（如机壳塑料上的防火涂层含有毒制剂，一台计算机中含有大约1.14kg的有害元素，主要是铅），使用后如填埋不当，就会渗透出来，污染土地；如果进行焚烧，将污染空气。据测算，制造一台计算机需耗水3.3万L、耗电2315度。家用计算机耗电量约100W，相当多的用户，实际使用时间只有开机时间的1/5，因而造成电力浪费。计算机开机时产生的电磁波，会对其他电器产生干扰，并危害人体健康。另外，计算机包装材料、填充物不易降解，易形成白色污染。美国的硅谷，一方面计算机、信息技术等“清洁”或“朝阳”工业兴起，同时也成为美国危险废物密集度最高的区域。由于新的高性能计算机的不断涌现，许多旧型号计算机被废置和淘汰，计算机、色带、油墨盒难以处理。这些电子垃圾的年增长率为3%到5%，今后5年内将达10%。目前欧洲一年大约更换1000万台个人用计算机，其中一半将成为垃圾，只有5%被回收或被适当处理；每年消耗打印机色带约5亿盒，油墨约6000万盒，其中绝大多数不做任何处理即扔进垃圾箱。1998年美国共淘汰2000万台计算机，但只有11%的零件被再生利用。预计今后10年，全球还将有1.5亿台计算机被淘汰。这些高科技垃圾已逐渐引起关注。欧盟法令规定，从2008年起将限制新生电子产品中危险物质的含量，并将实行“谁生产谁负责回收”。现今国内计算机企业还未涉及真正的废旧物回收。

有人认为21世纪是基因的时代，即可用基因技术改变生活，造福于人类。因此，克隆生物、转基因植物相继问世，随基因研究不断出现突破，也有科学家担心：克隆技术只能增加某个物种的数量，而不会增加其基因的多样性；转基因植物或许会获某种优势而失去其他优势，或许会因其优势排挤其他物种，或许会给人类带来致命的疾病。20世纪初，英国用生物遗传技术改良牛的品种，经过多代的基因改良，培育出良种牛。1986年疯牛病在英国出现，这些良种牛对疯牛病毫无抵抗力。后来在一个偏僻的小农场里发现，一对老夫妇喂养的一群没有经过基因改良的瘦小丑陋的牛没有患疯牛病。这一发现使人们开始对基因改良产生怀疑。

表 2－1　环境与发展问题的历史阶段

发展阶段 内容	发展＝经济增长			发展－经济发展＋工业污染控制	发展－经济社会发展＋环境保护	环境与发展密不可分(环境是发展自身的要素之一)
	前发展时期	农业革命时期	工业革命时期			
时间跨度	1万年前	1万年前至18世纪	18世纪至20世纪50年代	20世纪50年代末至70年代(1972年)	1972年至1992年	1992年－现在
经济水平	融于天然食物链中	农业时代	工业时代	产业急速发展时期	信息时代	信息时代
经济特点	采食捕猎	自给型经济	商品型经济	发达的市场经济	发达的市场经济	协调型经济
生产模式	从手到口	简单技术与工具	资源型模式	资源型模式	资源型模式	技术型模式
对自然的态度	自然拜物主义,依赖自然	天定胜人改造自然	人定胜天征服自然	尊重自然	天人合一善待自然	人与自然和谐
系统识别	无结构系统	简单网络结构	复杂功能结构	自然、社会、经济复合系统	多功能复合系统	控制协调结构
能源输入	人体畜力及简单天然动力	不可再生能源为主	不可再生能源为主	不可再生能源为主	逐步转向可再生能源为主	新能源、可再生能源
环境影响	原始状态的协调	基本协调	不协调(生态不平衡)	极度不协调	寻找出路	可持续发展

注：摘自马光：环境与可持续发展导论，科学出版社，2000年。

美国、日本等发达国家曾出现严重的环境污染，这是由于当时对生态环境问题的认识不足产生的，走了“先污染后治理”的道路，并由此付出了昂贵代价。现在，工业文明的这种负面效应（即破坏了人与自然界之间的协调，带来了环境污染、生态失衡、资源枯竭等问题）已被人类普遍认同。对传统的以追求国民生产总值增长为主要目标的经济发展模式产生的一系列严重弊端（其中最突出的是环境污染和资源浪费）也开始反思。生态环境问题可超越国界，地球生态环境是统一的系统，各个部分之间、各个地区之间、过去和未来之间存在复杂的关系。某个地域里发生的生态环境变化，会引起其他地域的变化，今天的生态环境变化还会影响未来的状态。工业革命以来，人类活动对生态环境的影响越来越大，不仅改变了地球生态环境的原始面貌，也改变人类自身的生存状态和生存态度。人类逐渐认识到“只有一个地球”、全人类有着“共同的未来”、人类和自然界的命运是休戚相关的。1992 年在巴西里约热内卢召开的世界环境和发展大会标志着人类开始意识到：要更好地生存，必须保护生态环境，必须进行全球合作，对以往的发展道路作调整，保持生态、经济和社会发展的可持续性。人类对生态环境问题的认识和理解是一个逐渐加深的过程，生态环境问题，已经是生存问题，而不是选择问题。

三、生态环境问题的影响

1. 环境污染和变化危及生物、人类健康和生存环境

地壳中约有近百种化学元素，由于人类活动使这些元素扩散、迁移、富集，并通过食物链，转移到人或其他生物体内。许多有毒的物质在扩散迁移过程中的延缓效应、积存效应、突变效应加大了这些有毒物质对环境和生物的危害和影响。

化石燃料的使用引起温室效应导致全球变暖，并对生态环境产生连锁影响，如某些北极圈内特有的植物花期提前，致使按期而来的蜜蜂因错过花期而不能授粉，而使这些植物数量锐减。

英国、法国、日本等很多国家对境内河流中生物的性态进行过调查。在英国的爱尔河，发现 100% 的石斑鱼雄鱼变雌鱼，还有部分平眼鱼出现雌化现象。法国赛纳河中的雄鲽鱼出现排卵现象。流经日本东京都的 7 条河流也发现有 25% 的雄鲤鱼血清中含卵黄素。1995 年在美国明尼苏达州河流和湿地发现三条腿的畸形青蛙，随后在美国南部、东部、中西部和加拿大也发现畸形青蛙，所占比例达 10%，其中一种雕蛙，畸形个体达 75%。用该区受污染的水培养体态正常的非洲瓜蛙，结果培养出的瓜蛙 100% 的胚胎畸形，这说明不是生物个体的畸变，而是环境污染造成的生物物种变异的结果。1998 年挪威科学家在北极发现 6 只北极雌性小熊长出雄性器官，这一消息曾引起轰动。

联合国开发计划署和世界银行编写的《世界资源报告（1998～1999）》认为，人类的疾病有病毒或遗传因素，但至少有 1/4 的疾病与环境有关。已有专家把人类疾病分成两种：一种是由病毒、细菌或遗传引起的病（传统病），这些病在现在或将来都可以治。另一种是非传统病，或可称为“生态环境地质病”，指人类或地质活动使化学元素、特别是有毒的元素，扩散迁移、富集，最后进入人体所发生的疾病。这种病目前还只能防不能治或不能全治。据统计，因为环境污染，全球有 1100 万儿童活不到 5 岁，仅因空气污染引发的急性呼吸系统感染，每年有 400 万儿童死亡。地球上大约有 80% 到 90% 的多发病或高危病以环境污染为背景。美国对 15 年间人的健康状况进行的调查认为，受污染最少与最多的城市居民间寿命差距达 30%。我国的统计数据显示：每 13 秒钟有 1 人死于心血管病；台湾省每年有 3 万多人死于癌症，大陆地区每年有 130 万人死于癌症，癌症在我国从 1997 年上升为死因的第一

位。每年还有10万人因为蔬菜而中毒死亡或者残疾。每年还有20万人因药品不良反应死亡。地区性环境污染还造成地方病。20世纪50至60年代的日本就曾因为严重的环境污染爆发震惊世界的地方病。

1）1953～1956年的水俣病

水俣病是人或其他动物体经口腔摄入被有机水银污染的鱼或贝类，有机水银侵入脑神经细胞所引起的综合性疾病。因最早在日本熊本县水俣湾发现而得名。在人患病之前，已经发现水俣湾地区的猫有突然狂舞、乱跳，以至投海死亡的事例，被当地渔民们视为不祥之兆。据记载，最早的水俣病病例是1956年4月在一名5岁零11个月的女孩身上发现，其病历这样记载："1956年3月下旬，曾有一日发烧，其后是吃饭时不能很好地使用筷子，爱掉米粒，同时自己不能顺利穿鞋；4月14日前后开始，走路摇摆；4月17日，语言迟钝，食物难以下咽，夜晚无法入睡，并逐渐狂躁不安；4月21日，容颜痴呆，乱发狂叫，瞳孔轻度放大，口舌干燥；4月23日，四肢运动障碍增强；4月26日，上下肢反射亢进，连续不眠，时常全身性痉挛，咬舌流血；5月2日，全身性痉挛频繁发生，四肢僵硬；5月28日失明，对于刺激失去反应，手脚屈曲、变形"。后经查明病因是水俣氮素工厂的乙醛醋酸设备内生成的甲基水银化合物所导致。

2）1955～1972年日本富山的骨痛病

日本富山县神奈川流域，由于锌、铅冶炼厂排放含镉废水，污染了神奈川水体，两岸居民用含镉水灌溉农田，使稻米含镉。居民食用含镉稻米和饮用含镉水中毒。1955年，神奈川河里鱼大量死亡，两岸稻田大面积死秧减产。以后，又出现怪病：患者初期腰、背、膝关节疼痛，随后发生遍及全身的神经痛和骨痛，使人无法行动，甚至呼吸都带来难以忍受的疼痛，最后骨骼软化萎缩，自然骨折，直到饮食不进，在衰弱和疼痛中死去。对患者尸检发现，有的骨折达70多处，身长缩短30cm，骨骼严重畸形。1961年查明，骨痛病与炼锌厂污水有关。该厂工人因镉中毒患病者也不少。有的孕妇因镉中毒使钙质遭破坏，骨痛无法忍受而自杀。

3）1961年四日市的气喘病

四日市位于日本东海岸伊势湾，近海临河交通方便。1955年起先后建成三个石油联合企业，有十多个大厂和一百多个中小工厂。因工厂排污，使附近空气污浊、臭水横流、噪声震耳。1956年，含酚废水排入伊势湾，使附近海域水产品发臭不能食用。工厂年排出二氧化硫和粉尘总量达13万t，超过允许浓度的5～6倍。烟雾中还含有铜、锰、钛等有毒金属粉尘。重金属粉尘促使二氧化硫形成硫酸烟雾，人吸入肺部后削弱肺部排毒能力，引起支气管炎、支气管哮喘以及肺气肿等呼吸道疾病。有毒物质还能进入血液，导致癌症。由于以哮喘为主要症状，因此统称为"四日市哮喘病"。1961年"四日市哮喘病"开始发作，1964年重患者开始死亡，到1970年患者已达500多人。后来这种病在日本许多大城市蔓延。1972年患者人数多达6376人。最初找不到病因，也未能联想到是大气污染所致。直到1965年，才注意到是SO_2所致。

4）1968年的米糠油事件

1968年3月，日本九州、四国等地几十万只鸡突然死亡。经检验，发现饲料有毒，但没有引起注意。不久，在北九州、爱知县发现怪病：患者起初眼皮发肿，手掌出汗，全身起红疙瘩；严重者呕吐恶心，肝功能下降，全身肌肉疼痛，咳嗽不止，有的医治无效死亡。这种病来势很猛，患者很快达1400多人，并蔓延到北九州23个府县。7～8月达到高潮，患

者达5000多人，有16人死亡。实际受害者13000多人。后经查明，九州大牟田市一家粮食加工厂，在生产米糠油时，为降低成本，在脱臭工艺中用多氯联苯做热载体。但因管理不善，这种毒物混进米糠油中。有毒的米糠油销售各地，许多人食用后生病或死亡。不仅中毒者发生急性中毒症状，而且接触多氯联苯的母亲在7年后所产下的婴儿出现色素沉着过度、指甲和牙齿变形、到7岁时仍智力发育不全、行为异常等现象。生产米糠油的副产品黑油做家禽饲料，又造成几十万只鸡死亡。

类似的由环境污染引发的地方病在许多地方都有发现。50年前，泰国某地出现了从未见过的“黑脚病”：患者脚部皮肤先发黑，后溃烂，最后坏死。开始人们没有警惕，1987年、该地区成年人100%都患病，患者劳动力全部丧失。虽然泰国政府企图解决，但直到7年后的1994年才查明原来是该区矿山开挖遗留的废矿渣风化，有毒的元素砷扩散到水中，居民生活用水中的砷元素严重超标所致。

核电是目前成本最低的能源，但也可能由于核泄漏造成污染，带来灾难。1986年4月26日，原苏联的切尔诺贝利核电站发生爆炸。事故造成的放射性污染遍及有694.5万人居住的15万km^2的地区。核电站周围30km范围被划为隔离区，庄稼被全部掩埋，周围7km内的树木逐渐死亡。在日后长达半个世纪的时间里，10km范围以内不能耕作、放牧；10年内100km范围内被禁止生产牛奶。临近国家检测到超常的放射性尘埃，致使粮食、蔬菜、奶制品的生产都遭受了巨大的损失。事故后的7年中，有7000名清理人员死亡，其中1/3是自杀。参加医疗救援的工作人员中，有40%的人患了精神疾病或永久性记忆丧失。时至今日，参加救援工作的83.4万人中，已有5.5万人丧生，15万人成为残疾，30多万人受放射伤害死去。

国内外都有资料表明由于环境污染，男子的生育能力下降。国家计划生育委员会对1981年到1996年的16年中，北京、上海、天津等39个城市11726名健康男性的精液量、精子数目、精子活动率进行对比，结果表明，我国男子每次平均射精量从1981年的3.31mL，降低为1996年的2.97mL，即16年间下降了10.3%。从1981年到1996年每次射精的精子数目减少18.6%，尤其是1984年到1996年每次射精的平均精子数从3.6596亿个降低为2.5389亿个，13年内降低了近1/3。从1981年到1996年，每次射精的精子活动率降低10.4%，正常形态精子率降低8.4%。这与国外科学家公布的结果一致，丹麦科学家对21个国家1938～1990年有关的61篇论文的研究认为，在过去50年内，男子精子数目减少了40%，精液量减少了20%。

目前世界上患结缔组织病的人数在增加，病因不明，但不排除环境污染的因素。目前，中国兴起居室装修热。装修所用的建筑材料、油漆和粘胶等中多少含甲醛、苯、氨、氡等有害物。北京市儿童医院对来该院治疗的100多名白血病幼儿患者作了一年的调查，发现其中90%的儿童或幼儿患者的家庭在半年之内都作过房屋装修。

2. *资源开发利用不当引起生态环境变化*

自然资源开发，既改善了人类的生活质量，也改变自然的生态环境。联合国环境与经济发展委员会1992年的调查表明，在过去20年间损失了5亿t表土、5亿亩树林，随热带雨林消失的生物物种接近100万种。

日本东京附近的足尾铜山，古来是风景区，处处苍松翠柏，鸟语花香。1600年开始开发含硫量30%～40%的铜矿，矿石精炼，产生大量SO_2。在铜矿开采的几百年间，特别是19世纪末到20世纪初，SO_2未经处理排入空气。高浓度的SO_2气体首先将树叶漂白枯死，

延续不断的毒气使附近几百年的大树逐渐枯死。随树木成片枯死，水土也难以保持。日本年均降雨量超过2000mm，大量的表土随雨水流失，河流逐渐混浊，河道也逐渐变窄变浅，矿物中残留的毒素直接影响居民生活用水。下游几万 hm^2 良田被含重金属颗粒和矿渣的污水污染，土地板结，导致经济状况恶化，居民健康受损。现在矿山开采已经停止多年，但矿山附近的14座大尾矿堆积场遇大雨和地震，渗出水中的砷含量仍超标几十倍；原冶炼厂周围3000多 km^2 的山峦，至今仍光秃一片。要彻底治理，防止水土流失，还要经过百年以上。

东南亚曾是森林覆盖率非常高的地区，热带雨林面积仅次于亚马逊森林，居世界第二。但随着对热带雨林的无节制的砍伐，传统的刀耕火种方式对森林的破坏和战乱，栽种林木的速度远落后于森林被砍伐的速度。印尼每年消失的森林面积达到 $9000km^2$，马来西亚为 $2550km^2$，泰国为 $1588km^2$，菲律宾为 $1430m^2$。森林的急剧减少，已使菲律宾由木材主要出口国变成了木材进口国。柬埔寨的森林覆盖率在20世纪60年代末期为73%，1996年下降到了49%。1990～1995年马来西亚森林覆盖率平均每年减少2.5%，菲律宾3.6%，泰国2.8%。由于森林急剧减少，水土流失加剧，土壤肥力丧失，水利工程破坏，可灌溉地减少，洪水爆发，使得生物多样性和人与自然的和谐关系受到破坏。1990年菲律宾的莱特岛（Leytc）爆发的洪水，一夜之间的死亡人数比长达22年之久的反政府叛乱造成的死亡人数还多。森林的急剧减少还导致温室气体排放量的增加和跨边界的空气污染。印度尼西亚1997年森林火灾是明显事例。1998年的报告显示：一片面积比美国大陆还大的烟雾笼罩着东南亚，整个天空都变成了黑色，至少2000万人生活在有毒的、污浊的空气中，死亡人数数以百计。受影响的地区包括文莱、印度尼西亚、马来西亚、巴布亚新几内亚、菲律宾、新加坡、泰国、越南，连远在1000km以外的城市都不能免受污染。

屯田是我国历史上戍边的重要政策，从战国时期实行屯田起，到中国统一后汉武帝（公元前140～公元前88年在位）经营西域，屯田被确认为国策。现代，屯垦戍边仍是我国西部与北部边疆省、区重要政策之一。屯田使生产发展，军需有保障，人民负担减轻，边防和社会稳定。然而，我国西北干旱半干旱地区，属于荒漠、半荒漠和干草原带，自古以来是游牧民族的牧场，生态环境脆弱，并不适合农耕。屯田垦荒无不以牺牲生态环境为代价，毁灭了林草植被和地表土层，造成地下粉沙出露，诱发风沙和流沙堆积。汉武帝打败匈奴后曾在弱水（今额济纳河）下游，新疆的轮台、伊循城（今米兰）、库车、沙雅、新和等地大规模屯垦，并取得显赫一时的业绩。如弱河下游的垦区和轮台垦区曾享有"居延大粮仓"和"西域粮仓"的盛名。东汉年间修筑的"横断注宾河（古孔雀河）"的水利灌溉工程完成后，"大田三年"便"积粟百万"，使西域各国一一归服。然而"横断注宾河"工程造成了孔雀河下游断流，著名的楼兰古城就此废弃。

天山南部的塔里木河盆地是世界胡杨林面积最大、最集中的分布区。20世纪50年代后期，新疆生产建设兵团在塔里木河流域铲除了200多万亩胡杨林，建设了30多个大型国营农场。单一的农业经济破坏了生态平衡，从根本上动摇了农业生产的自然基础。过了几十年，塔里木河流域新开垦的农田因沙化和盐碱化而弃耕20多万亩，废弃农牧场70多处。与此同时，水资源滥用造成塔里木河下游断流320km，台塔玛湖干涸，由胡杨林等沙生植被组成的绿色走廊在10年间由81万亩减至11万亩。塔克拉玛干和库姆塔格两大沙漠，在绿色消失之处开始合拢，新疆建设兵团的5个团场5万多人面临着搬迁或转产。这种拓展生存空间的美好初衷最后却以自毁家园、土地荒漠化为结局。

人类活动还影响地球上的生物多样性。地球经历的约50亿年中，形成过约10亿个物

种，但多已灭绝。据考证：远古时期，无脊椎动物约每3000年形成1个新物种，每3000年灭绝一个物种。鸟类在3500万年前～100万年前，平均每300年灭绝1种；100万年前到现在，平均50年灭绝1种；最近300年间，平均每2年灭绝1种；20世纪后，约每年灭绝1种。哺乳类350万年前，平均每个世纪灭绝0.01种；10万年前，平均每百年灭绝0.08种；17世纪以来，平均每百年灭绝17种。在过去100年中，美国玉米品种丧失91%，蕃茄品种丧失81%；从20世纪40年代末到70年代，中国小麦品种从1万种锐减到1000种。人类活动造成物种破坏速度是自然状态下的1000倍。地球上动物、植物、微生物和自然环境之间有相互依存、相互作用的关系，任何物种的丧失都会通过食物链影响其他生物。每消失一种植物，会有10～30种依附于该植物的动物和微生物随之消失。物种大量快速消失会破坏生态平衡，使自然界中的“天敌”和“猎物”之间失去平衡。

上述种种事例说明，人类要尊重自然规律。对各种自然资源，如野生动植物、江河湖泊、高山冰川、森林植被、地下水和矿产资源等，应科学地开发利用，并尽量减少对环境的污染和生态平衡的破坏。今天，中国正在建设或规划“三峡工程”、“南水北调”、“西气东输”、“青藏铁路”等工程，都涉及生态环境问题，在实施前有必要权衡利弊、择善而从，尽量避免产生“人祸”。

3. 环境问题会引发各类社会问题甚至国际问题

生态环境是人类活动的基础，不仅影响一个地区、一个国家、一代人，而且也关系到人类的可持续发展。生态环境恶化会损害国家存在的基础。20世纪80年代后期世界各国纷纷将生态安全纳入其国家的安全战略。环境破坏造成的生态失衡是渐进的过程，短时间内不易看出后果，随着时间推移，其累积效应非常明显，后果可能是灾难性的、长期性的，要恢复原有生态环境，花费巨大，甚至不可能。

20世纪后期，汽车工业是全球范围内发展最快的产业。全世界现有汽车5.2亿辆，并仍以每年1100万辆的速度增长。新增车辆中，发展中国家所占比例越来越大。随汽车数量急剧增加，大量耕地被建成公路和停车场。若中国的人均汽车拥有量达到目前日本的水平(即平均每两人一辆)，而且每辆车耗用土地面积与欧洲和日本相同（为$0.02hm^2$)，则中国将有6.4亿辆汽车（是目前拥有的1300万辆的约250倍）并耗用1300万hm^2（1.95亿亩）土地，这已超过中国现有2300万hm^2（3.45亿亩）水稻田的一半。有人说，汽车和农作物争夺土地的战斗，成了买得起汽车的富人和为生存而奋斗的穷人之间的竞争。中国、印度、印度尼西亚、孟加拉、巴基斯坦、埃及和墨西哥等人口密集的国家没有足够的土地在发展以家用汽车为主的交通体系的同时养活其人口。在土地短缺的国家，应该慎重评估汽车的发展，设计为大多数人提高机动能力的交通体系，而且还应不威胁到农产品供应的安全。北京市1994年宣布，将汽车工业列为今后几十年的一个增长点时，一批杰出的科学家（其中很多是中国科学院院士）发表白皮书提出质疑。

现在，中国许多城市兴建高尔夫球场。如北京已经建成高尔夫球场15～16个（包括4个练习场），目前还规划在朝阳区、海淀区、昌平区和丰台区兴建5个高尔夫球场，球场还要由远郊区进入城区。而世界各地的高尔夫球场都设在远郊区，是因为郊外自然环境适宜，也是为了社会公平，使城市宝贵的空间能为多数人服务。另外，高尔夫球场的建设除了占用大量土地外，还有不少树木、植被和动物聚积地遭受破坏，被改造成高度人工化的环境。种植的草坪，一年四季要大量浇水，在缺水的北方，要消耗大量水资源；为使人工种植的草坪不长杂草、保持新绿，还要大量喷洒化肥、农药，所需的化学用品多达数十种，所使用的药

量比农业用药高7倍。日本的调查表明，高尔夫球场周围的长期居民、球场雇员和经常打高尔夫的人是杀虫剂中毒的高危人群，国外已发现因长期打高尔夫而中毒身亡的病例。此外，高尔夫球场附设的别墅、宾馆排放的污水，会加速农药等化学制品的扩散，污染地表和地下水。2000年4月广州市人大代表以保护风景名胜区和公民权利为由对在白云山兴建高尔夫球场提出疑问。

近年来，随移动通信事业发展，电磁波辐射污染问题受到关注。据北京市统计，2000年底，各类移动通信台站已超过3000个。1998～2000年，北京市环保局处理有关电磁污染的人大代表、政协委员提案和群众来信的数量呈逐年上升的趋势。广州的白云机场已经多次发生移动通讯影响飞机和指挥塔台的通信联络。

1997年由于厄尔尼诺现象引起全球气候异常，使印度尼西亚持续异常干燥，雨季从10月份推迟到12月份，8月份开始的烧荒之火未被雨水及时浇灭，蔓延成森林大火一直烧到次年5月，使2900km^{2}森林被毁，浓烟笼罩整个东南亚。9月末，印尼全国4万人因呼吸系统疾病住进医院，17人死亡。大雾引起视野不清，机场被迫关闭，9～10月有3372个航班被取消。9月26日，一架印尼客机坠毁，机上乘客和机组人员234人丧生。森林大火引起粮食减产、交通堵塞、旅游客源锐减、经济恶化，使1700万人再度陷入贫困之中。很多猩猩由于找不到食物而饿死，象群由于失去了食物来源离开常年居所，或者为寻求食物而袭击村庄。

环境污染和生态环境问题还会引发国家之间的争端。像SO_2、酸雨等污染的转移已经引起过美国和加拿大间的纠纷。发达国家可以借保护世界生态环境的名义侵害发展中国家的主权。例如，美国政府公开声称，隶属于巴西的亚马逊热带雨林对世界气候有重大调节作用，是国际财产，禁止巴西采伐，产生争端。

全世界每年产生的危险废弃物3亿t以上，据联合国有关机构统计，世界上绝大多数有毒污染源于发达国家，仅经合组织的20多个国家就生产了全世界有毒垃圾的95%，其中美国、德国、英国、荷兰和澳大利亚是5个最大的有毒垃圾生产国。由于用一般的工业方法很难将有毒物转变成无毒物，而且一些有毒物质再生利用过程中往往释放出毒性更大的废弃物。很多发达国家在处理危险废物的环保法规和标准也日益严格，处理费用高昂，在美国，1t有毒废物的处理费达400美元以上，比20世纪70年代上涨了16倍。在一些发展中国家，因环境标准低，危险废物的处理费仅为美国的1/10。使一些商人将大批有害废物越境转移到发展中国家。发达国家把向穷国出口和倾倒有毒垃圾当成处理这类垃圾最简便和最经济的方法。花少量的钱通过黑社会运走有毒废弃物，在发达国家企业中似乎已成为惯例。如德国是在国内环境污染限制方面最严格的国家，但同时又是世界上最大的有毒废弃物输出国。据报道，1986～1988年间，发达国家向发展中国家出口的危险废物就达600多万t。联合国在1996年的一项报告中指出，非洲已经成为发达国家非法倾倒有毒和有害物质的最大的“垃圾场”，亚洲、拉丁美洲和中东地区也受到不同程度的侵害。1988年，意大利一家公司将约3800t有害废物堆放在尼日利亚本德尔州科科港附近一农民的土地上。废物散发出恶臭，渗出脏水，从中检验出致癌性极高的化学物质——聚氯丁烯苯基。这些有害废物造成很多码头工人及其家属瘫痪或被灼伤，有19人因食用被污染了的米而中毒死亡。尼日利亚为此甚至从意大利撤回了大使。

近年来这类非法行为不但没有收敛，反而在手法和范围上有了新的发展。美国司法部的一份报告承认，“现在一些污染工业部门摆脱有毒废料的策略中又增加了贿赂当地官员、假

手当地中介公司和皮包公司等内容。”例如，一些跨国公司把有毒和有害物质当作建筑原材料或再生原料出口到发展中国家。1996 年 4 月北京平谷县的“洋垃圾”事件就是美国某公司假借出口混合废纸的名义向中国倾倒有害废物。发达国家还利用一些发展中国家物质匮乏的困境，向这些国家出售在其国内已被禁售的药品、食品和建筑材料；一些发达国家和跨国公司还利用发展中国家在立法和执法方面的漏洞，把污染工业转移到发展中国家。

为阻止污染转移，1989 年 3 月 22 日《关于有害废物越境转移及其处置的巴塞尔公约》在瑞士通过。但目前每 5h 仍有一船危险废物跨越国界。在联合国人权委员会第 52 届会议上，关于制止向发展中国家非法倾倒有毒物质的决议以 32 票赞成、16 票反对和 3 票弃权通过，但几乎所有发达国家都投反对票。

我国是危险废物转移的重要目标国，入境量大，增势迅猛。1990 年进口 99 万 t，进口额 2.6 亿美元，占当年进口额的 0.49%；1997 年废物进口量为历史最高的 1119 万 t，进口额增至 29.5 亿美元，占进口总额的 2.07%（见表 2－2）。进口废物中属危险废物及国家禁止进口物占较大比重。危险废物主要来自发达国家，1997 年从美国、日本进口的废物别分占进口废弃物总量的 24.25%、9.88%。从海关查获的情况看，浙江、江苏、福建、广东、山东等沿海地区是主要进口口岸，乡镇企业是危险废物的主要使用者。洋垃圾大量进口，严重影响生态环境，一些地区的水质、大气、耕地被污染，许多人受到病菌的感染。

表 2－2 1990～1997 年我国进口废物状况

年 份	全国进口	废物进口		
	总额，万美元	数量，t	金额，万美元	占%[①]
1990	5334500	991542	25999.2	0.49
1991	6379100	2114410	60610.5	0.95
1992	8058500	5715823	134326.0	1.67
1993	10395900	8285361	157448.7	1.50
1994	11561400	6668963	136067.4	1.18
1995	13208354	6523505	172987.0	1.31
1996	13883278	8052626	226178.3	1.63
1997	14237036	11193339	295008.6	2.07

注：资料来源：叶汝求等：环境与贸易，中国环境科学出版社，2001 年；
①指占全国进口总额的比重。

我国是引进外资的大国。1993 年以来，已连续 6 年成为仅次于美国的居世界第二位的外商投资国。1998 年底，我国累计设立外资企业 324667 个，协议外资额 5725 亿美元，实际使用外资 2674 亿美元。1997 年我国引进外资占世界总流入的 11.31%，占发展中国家流入的 30.42%。外资对我国经济发展有促进作用。但不可忽视的是一些外商投资于污染密集产业，将发达国家淘汰的技术、设备、工艺、危险废物等转移到我国，对我国的生态环境造成危害。据 1995 年第三次工业普查资料，外商投资于污染密集产业的企业有 16998 家，工业产值 4153 亿元，从业人数 295.5 万人，分别占全国企业相应指标的 0.23%、5.05% 和 2.01%；其中投资于严重污染密集产业的企业有 7487 家，工业产值 1984 亿元，从业人数 118.6 万人，分别占全国的 0.10%、2.41% 和 0.81%。这些说明污染密集产业，特别是严重污染密集产业是外商投资的重要产业。乡及乡以上独立核算三资企业投资于污染密集产业

的企业有14189家，工业产值3793亿元，从业人数218.7万人，分别占全国的2.78%、6.90%和2.55%；其中投资于严重污染密集产业的企业有6493家，工业产值1867.1亿元，从业人数91.1万人，分别占全国的1.27%、3.40%和1.06%。

我国外资企业中70%以上的引进设备为中低档水平。其中许多属于其国内已废弃的工艺和禁止生产的产品。如“氟蚜满”乳油是日本于1964年开发、1975年就禁止在国内生产的产品，1992年转移到我国。结果在1993年7～8月间发生了6起农药中毒事件，导致3人死亡。另外，一些外资企业不重视配套引进环境保护设施和劳动保护设施，或不配套引进，有的引进了环保设备后长期闲置，有些引进的环保设备甚至只为应付检查。据广东对特区的调查，有配套防护设施的项目仅占28.4%。广东对600家外资企业调查发现，70%的企业在引进设备中没有引进环保设备。因此，恶性中毒事故及劳资纠纷屡有发生。这种情况使由外资企业引发的水污染、铅污染、砷污染、二氧化硫污染、汞污染等大事故不断发生。

有关保护臭氧层的国际公约实施以来，发达国家的投资者将消耗臭氧层的物质（ODS）的生产和消费转移到中国，并集中于清洗、制冷等行业。据国家环保总局1997年2月对广东省1994～1996年批准的外资企业进行的调查，泡沫和清洗业共有120家，深圳占48.33%，广州、惠州和番禺各占6.67%。1996年广东从法国、美国、日本进口ODS总量达5864t，其中东莞和深圳占进口量的62.8%。不少外资企业直接使用ODS。制冷行业和气溶胶行业的大型外资企业在国际市场的压力下，已开始注意保护臭氧层问题。但一些外资企业无视臭氧层保护。外商以直接投资方式转移ODS生产与消费将影响我国淘汰受控物质的进程，使我国不能尽快减少ODS使用量，影响中国履行对国际社会的承诺。

由于气候变化给全人类带来的种种问题，1992年在巴西里约热内卢召开的联合国环境与发展大会上，签署了《联合国气候变化框架公约》。1997年150多个缔约方签署了《京都议定书》。《京都议定书》对缔约方（主要是发达国家）温室气体排放量作出限制，要求在2012年温室气体排放量比1990年减少5.2%，其中欧盟平均减少8%，美国7%，日本6%。美国累计排放的温室气体总量、能源消费量均居世界首位，人均能源消费和温室气体排放量也居世界前列。根据国际能源署的统计，美国人口占世界人口总数的5%，但温室气体排放量却占世界总数的24%，人均排放量是世界平均水平的5.2倍，是德国的1.9倍，英国的2.2倍，日本的2.25倍，法国的3.2倍，中国的8.7倍。美国经济是以对世界能源资源和生态环境的掠夺为基础的。而美国拒绝履行《京都议定书》中的有关减少温室气体排放责任，遭到国际社会的普遍不满。今后各国在资源和生态环境上的冲突还将继续。

4. 生态环境已成为综合国力中有战略意义的一个方面

1993年6月美国政府发表的“关于美国竞争力的年度报告书”中指出：在美国应当培育的、以重要技术为基础的产业中，环境产业位于首要地位。即已将生态环境产业列为能够维持美国竞争力的战略性产业，将人力和资金从与军事技术有关产业转移到新能源、节能及生态环境有关的技术开发。1989年北美绿色产品贸易额为1060亿美元，西欧为1000亿美元，亚太为500亿美元。1999年，全球的绿色产品贸易额达5000亿美元。绿色产品贸易额中，发达国家有明显优势：国际市场上有近1/5的环保产品来自德国，德国环保产品年出口额约350亿马克，2005年德国的环保技术销售额可望达2000亿马克。

发展中国家获得经济发展所需资金和技术始终是重要问题，为此，积极改善“投资环境”。早期对“投资环境”仅局限的理解为“水、电、公路”通畅，现在意识到生态环境是“投资环境”的重要内容。但目前发展中国家治理环境污染和改善生态环境所需技术主要依

赖进口，投入的经费也很有限。

5. 绿色贸易壁垒导致产生“环境殖民地”

通过利用环境标准的不同，发达国家在掠夺发展中国家的资源的同时，将污染企业和技术向发展中国家转移，使发展中国家的生态环境更加恶化。另外，又极力将环境问题与商品贸易挂钩，把环境作为新的贸易壁垒，即绿色贸易壁垒。绿色贸易壁垒（Green Trade Barrier），是指进口国以保护生态环境、自然资源、人类和动植物的健康为由的一系列贸易措施，使外国产品的进口受到限制。国际环境公约、WTO（世界贸易组织）协议中的环境条款、国际环境管理体系系列标准（ISO 14000）、环境标志制度、进口国国内环境与贸易法规、进口国环境与技术标准等，一方面有利于环境保护和可持续发展，另一发面也构成了绿色贸易壁垒。1999 年 8 月在俄罗斯的第一家中国超市——莫斯科大客隆超市创办时，经营者遇到的极大困难是，中国商品达到欧洲环境标准的寥寥无几。德国有成熟的替代偶氮染料的技术和设备，因此禁止在德国销售含偶氮染料的纺织品，但却不公布采用的检验方法和技术指标，迫使我国纺织品在出口前必须将染料运往德国检验，费用极其昂贵。日本、美国、欧盟制定的食品标准越来越严格，使我国有些产品的出口销售区域越来越窄。曾引起中国调味品业震荡的“欧盟封杀中国酱油”事件，就是 1999 年 10 月，欧盟对中国出口的酱油抽查，以部分酱油中的氯丙醇含量超标为由，禁止进口。

20 世纪 90 年代，部分发达国家提出用贸易限制来减小由环境成本不断提高导致的竞争力下降。“环境成本”是指在产品的生产和消费过程中对生态系统产生全部影响的总和。发展中国家由于承受着更为紧迫的生存与发展压力，因而来自内部的环保要求比较低，政府的环境管理能力和市场发育状况都落后，因而发展中国家制定的环境保护标准和执行标准的严格程度都落后于发达国家。同一种产品，在发展国家生产，其价格中包含的环境成本远低于发达国家。所以进口其产品可以少支付甚至不支付产品生产过程的环境成本。但是占了便宜的发达国家还以“反生态倾销”为借口设置关税壁垒，阻止发展中国家的产品进入其国内市场。提出应当对这类产品实施“反倾销”，征收“环保进口税”，借以保护在高环保标准下生产出来的产品的竞争能力。发达国家在保护自己的工业品的竞争力而要求发展中国家提高环保标准的同时，又积极阻挠联合国通过制止向发展中国家非法倾倒有毒废物的决议。有人认为，如今的发展中国家已经成了发达国家的“环境殖民地”，预计 21 世纪的许多国际争端都将由生态环境问题引起。

四、中国生态环境问题的特点

中国地域辽阔，人口众多，自然条件千差万别，经济发展又不均衡，因此产生的生态环境问题复杂多样：既有一个地区、一条河流或一个湖泊、一座城市的环境污染问题，又有全国性的耕地减少、土地荒漠化扩展、灾害频繁等问题。2000 年 6 月国家环境保护总局发表的“关于《1999 年中国环境状况公报》的说明”中指出：“我国环境形势仍然相当严峻。各项污染物排放总量很大，污染程度仍处于相当高的水平，一些地区的环境质量仍在恶化，相当多的城市水、气、声、土壤环境污染仍较严重，农村环境质量有所下降，生态恶化加剧的趋势尚未得到有效遏制，部分地区生态环境破坏的程度还在加剧”。这可从下面一些数字看出：

全国工业固体废弃物历年堆存量已超过 60 亿 t，由于各种垃圾堆存而侵占的土地面积多达 5 亿 m^2。

强沙尘暴天气从 20 世纪 50 年代的年平均 5 次增加到 20 世纪 90 年代的年平均 23 次。

每年新增水土流失面积 1 万 km^2；年均受旱面积从 20 世纪 50 年代的 1.2 亿亩增加到 20 世纪 90 年代末的年均 3.8 亿亩。2001 年春夏，我国北方持续高温、少雨、大风和沙尘暴，发生了 20 世纪 90 年代以来最为严重的干旱，辽宁省 900 余座水库中，有 351 座干涸；山东省 5 月份全省平均降雨量仅 6mm，为 1916 年有雨量记录以来最少的一年，农作物受旱面积约 4400 万亩；河南农作物受旱面积 3750 万亩，110 万人和 28 万头大牲畜临时性饮水困难；淮河上流断流，淮北一些湖泊（洪泽湖、微山湖）和水库（石梁合水库等）的水位持续下降。

据专家估计，中国环境污染每年损失大约 2830 亿元。其中水质污染损失 500 亿元，大气污染损失 200 亿元，生态环境破坏和自然灾害损失 2000 亿元，固体废弃物排放、噪声污染等造成的损失也高达 130 亿元。表 2－3 是中国环境污染引起的经济损失研究结果比较。

中国主要污染物的排放总量虽然得到一定程度的控制，但仍远高于环境的承载能力；生态恶化的趋势尚未得到有效遏制，全国生态环境破坏的范围在扩大、程度在加剧、危害在加重；全球变暖等全球环境问题也对中国产生一定影响。

表 2－3　中国环境问题引起的经济损失研究结果比较

承担研究的单位或作者	研究基准年	环境污染损失		生态破坏损失		环境问题总损失	
		亿元	占 GNP，%	亿元	占 GNP，%	亿元	占 GNP，%
过孝民、张惠勤	1983	381.55	6.75	497.52	8.9	883.08	15.6
金鉴明等	1985			1039.52	12.47		
中国社科院环发研究中心	1993	1085.1	3.16	2360.5	6.87	3445.6	10.03
国家环保局政策研究中心	1992	1096.5	4.5				
美国东西方研究中心	1990	367	2.1	952.5	5.4	1325	7.5
世界银行	1995	4430	7.7				

注：资料来源，张坤民：中国的改革开放政策与环境保护发展，上海环境科学，2001，20（2）：51～55。

应该看到，我国生态环境问题有以下一些特点：

1. 人口众多对生态环境造成巨大压力

中国是人口众多的国家，1760 年为 2 亿人口，1900 年为 4 亿人口，1954 年为 6 亿人口，1969 年为 8 亿人口，1981 年为 10 亿人口。近 20 年，中国政府注意控制人口的增长，人口自然增长率从 1978 年的 12.0‰，下降到 1996 年的 10.42‰。据 2000 年第五次全国人口普查的结果，我国大陆的人口已达 12.65 亿人，年均增长 1279 万人（年均增长率为 1.07%）。尽管人口增长为经济发展提供了人力资源和市场，但为维持众多人口的生存和要求提高生活质量的压力，使对自然资源的开发利用有相当的盲目性和随意性，引起自然资源相对短缺和对自然资源的浪费。人均土地、森林面积和水资源量下降。人均耕地少，不得不对耕地大量使用化肥和农药，造成土壤、水体及大气的污染。人口的增长，需要消耗大量的能源，由于我国以煤为主要能源，致使大气污染加剧。

中国城市人口从 1990 年的 3.019 亿人增加到 1996 年的 3.595 亿人。城市化率从 1990 年的 26.4%增加到 1996 年的 29.4%。2000 年普查结果为城镇人口占 36.22%，乡村人口占 63.78%，全国城市总数 663 个（见表 2－4）。

表 2－4　2000 年按城区非农业人口我国城市的分组情况

城市人口	城市个数	城市人口	城市个数
200 万以上	13	20～50 万	218
100～200 万	27	20 万以下	352
50～100 万	53	城市总数	663

随着中国经济和人口的增长、城市化的进一步快速发展，能源的需求和环境的负荷都在增加。一次能源消费总量从 1980 年的 6.0275 亿 t 标准煤，增加到 1996 年的 13.1557 亿 t 标准煤，能源的消费量以每年约 2％的速率增加。1995 年中国 CO_2 的总排放量达 319.24 亿 t，在全世界一百多个国家和地区中，仅次于美国（546.85 亿 t），比第三位的俄罗斯（181.80 亿 t）高约 43％。煤炭的消费量从 1980 年的 6.1 亿 t，增加到 1996 年的 13.88 亿 t，增加了近 1.27 倍。表 2－5 是世界能源结构组成情况，表 2－6 是世界和中国能源历年消费总量及构成统计。从这两个表可看出，中国能源消费结构中一直以煤炭为主。尽管近十几年来，发展了石油、天然气、水电和核电等能源，但原煤仍占能源的 70％左右（美国约占 20％，苏联 24％，日本 18％，法国 10％，世界平均 30％）。在煤炭消费构成中，中国民用煤所占比例较发达国家，如日本和美国大 30～40 倍，而且煤炭含硫和灰分较高。燃煤过程中产生大量的烟尘、SO_2，致使中国“大气中总悬浮颗粒物浓度（TSP）和二氧化硫（SO_2）的含量是属于全世界最高的”（见联合国环境规划署、世界银行编写的《世界资源报告（1998—1999)》)。

表 2－5　世界能源结构分析

单位：％

范围	年代	煤	石油	天然气	水力、核能
世界	1950	61.5	27.0	9.8	1.7
	1983	32.2	41.5	22.0	4.2
	2020（预计）	约 30	20.0	45	—

表 2－6　中国能源历年消费总量及构成统计

年份	能源消费总量[1] 万 t（标准煤）	占能源消费总量的比重，％			
		原煤	原油	天然气	水电[2]
1957	9644	92.3	4.6	0.1	3.0
1962	16540	89.2	6.6	0.9	3.2
1965	18901	86.5	10.3	0.9	2.7
1970	29291	80.9	14.7	0.9	3.5
1975	45425	71.9	21.1	2.5	4.6
1978	57144	70.7	22.7	3.2	3.4
1985	76682	75.8	17.1	2.2	4.9
1990	98703	76.2	16.6	2.1	5.1
1995	131176	74.6	17.5	1.8	6.1
1996	138948	74.7	18.0	1.8	5.5

续表

年份	能源消费总量[①] 万t（标准煤）	占能源消费总量的比重，%			
		原煤	原油	天然气	水电[②]
1997	138173	71.5	20.4	1.7	6.2
1998	132214	69.6	21.5	2.2	6.7
1999	130119	68.0	23.2	2.2	6.6
2000	128000	67.0	23.6	2.5	6.9

注：资料来源：2001年中国统计年鉴；

①2000年能源消费量为估算数；

②电力折算标准煤的系数根据当年平均发电煤耗计算。

航空照片显示，我国有200多座城市周围布满了垃圾堆场，大城市垃圾的出路问题已成为城市发展的大问题。我国城市生活垃圾的年生产量1994年为0.8亿t，近年已达1.5亿t，且每年以850万t的速度递增，到2010年将达到9亿t。家电、手机等消费量大（中国人均手机拥有量较低，但手机总数量已居世界第一），产生大量电机电子垃圾，全国每年报废的家用电器（如冰箱、洗衣机、电视机、热水器等）、办公用品（如复印机、计算机等）达数千万台，废电池数十亿只。这些都会加剧城市环境的污染和负荷。

城市大气污染非常严重。中国城市的大气污染目前主要是煤烟型污染，但随着中国汽车数量的增加，中国城市的大气污染在一些大城市已由煤烟型向汽车尾气型（光化学烟雾），或二者综合型转变。我国汽车年产量1991年70.9万辆，1999年185万辆，保有量由606万辆增加到1575万辆，增长161%，预计到2010年产量将达到435万辆，保有辆达到3600万辆。和日本、美国比，中国汽车的排放量在同样情况下是日本、美国的10～15倍。根据国家技术监督局1999年第一季度产品质量抽查结果表明，国产90[#]无铅汽油平均烯烃含量为43.2%，最高达58.2%，而发达国家汽油烯烃含量实测值在20%左右；国产车用汽油产品苯含量大于8%，最高达20.6%，而发达国家规定汽油苯含量不大于5%，到2000年不大于1%。硫、氮等污染物在石油产品的含量中也高于发达国家的标准。现采用的汽车尾气净化器对这种污染的减轻效果很有限。如今汽车尾气污染，已和燃煤一起成为了中国大中城市的主要污染源。

2．资源利用率不高

中国虽然是资源大国，但中国仍处于工业化的初期阶段，工业增长方式基本上仍处于粗放型扩大再生产的状态，尤其是大量的乡镇企业，资源和能源的消耗大，环境污染严重。资源开发粗放，在资源开采过程中，资源的采收率低（如矿产资源的采收率基本上是采一半，丢一半）。表2-7是世界各国商业能源使用情况。从表2-7可看出我国每kg能源所产生的GDP是极其低的，在发展中国家中甚至低于印度。我国煤的燃烧效率若提高5%～10%，则每年就能节煤0.5～1亿t，相当于几个大型煤矿的煤产量。

我国在资源综合利用和循环再生利用方面属世界上低水平，目前我国二次资源的平均利用率只相当于世界先进水平的1/4～1/3。如废纸利用率世界达到80%，而我国只有25%。农业用水所占比重过大，灌溉方式落后；钢铁和有色金属回收利用率低，仅为世界先进水平的1/2～1/4。根据国家经贸委的调查，我国每年可供综合利用而未利用的废弃物价值250亿元，每年可供回收而未回收的废弃物价值近70亿元，使人均资源量本来就少的我国在人口和资源上的矛盾更为紧张。

表 2-7　世界各国商业能源使用情况

国家和地区	商业能源的使用				每千克能源使用所产生的 GDP		人均二氧化碳排放量	
	使用总量 10^3t 石油当量		人均使用量 kg 石油当量		美元（1995 年价格）		t	
	1980 年	1996 年	1980 年	1996 年	1980 年	1996 年	1980 年	1996 年
世界总计	6954847	9317404	1622	1684	3.1	3.2	3.4	4.0
中国①	593109	1096800	604	902	0.3	0.7	1.5	2.8
中国香港	5681	12190	1127	1931	10.0	12.0	3.2	3.7
印度	242024	450287	352	476	0.6	0.8	0.5	1.1
日本	346491	510359	2967	4058	9.3	10.5	7.9	9.3
新加坡	6054	23851	2653	7835	4.6	3.8	13.2	21.6
美国	1811650	2134960	7973	8051	2.7	3.4	20.1	20.0
德国	360441	349552	4603	4267				
俄罗斯	764349	615899	5499	4169	0.5	0.5		10.7
英国	201299	234719	3574	3992	4.0	4.8	10.4	9.5

注：资料来源：世界银行《世界发展报告》2000 年；

①中国为世界银行统计数据。

3. 国民科学素质低，生态环境保护意识薄弱

我国教育和科学技术投入比例过低是我国落后的重要原因。据 1996 年的调查，中国公民有科学素养的仅占人口总数的 0.6%（美国为 6%，欧洲国家为 10%），其中基本理解科学知识的达 24.5%，基本了解科学过程的仅 2.6%，基本理解科学对社会影响的也只有 3.2%。多数公众的科学知识停留在较浅的层次。我国国民科学素质低的重要原因是投入不足。表 2-8 是我国和世界上主要国家在人均国内生产总值（GDP）、人均研究和发展（R&D）经费和主要科技指标的比较。从表 2-8 可见，中国科学技术研究与发展（R&D）的经费投入占国民生产总值（GDP）的比例之低，即使在发展中国家中也是下游，人均 R&D 经费（2.2 美元），甚至不如印度（2.6 美元），是世界平均值（78 美元）的 1/35。

表 2-8　中国和世界主要国家的人均 GDP、R&D 和科技人员科技成果数目的比较

国家	人均 GDP 美元①	人均 R&D 费用 美元	R&D 占 GDP 的比例，%	万人中的科技人员数目	每 10 万人被收录科技论文数目	每 10 万人申请专利数目
中国	620	2.2	0.49	3.33	2.2	5.6
美国	20980	645	2.66	36.59	176.7	233
俄罗斯	2240	—	0.82	58.7	26.7	—
德国	24158	458	2.48	29.4	113.6	257
英国	18700	371	2.19	22.22	184.9	240
法国	24900	458	2.45	23.68	127.9	148
日本	39640	597	2.94	42.05	91.0	369
韩国	9700	230	2.80	20.11	25.4	—

续表

国家	人均GDP美元①	人均R&D费用美元	R&D占GDP的比例,%	万人中的科技人员数目	每10万人被收录科技论文数目	每10万人申请专利数目
印度	340	2.6	0.80	1.28	2.4	—
巴西	3640	17	0.40	4.21	5.7	—
意大利	19020	236	1.31	13.01	82.2	75

①1995年数字。

现代环境问题的解决和环境污染的治理，在根本上取决于科学技术发展的水平。现在全球都在面向21世纪发展生态化经济，生态化是部分建立在现代科学技术基础之上，它需要良好的现代科技素养基础。而中国现在的环保人才储备薄弱，环保行业人员素质也待提高，现有的环保科技和环保设施和发达国家相比，差距也还很大。如按产品结构、性能和质量三个指标分析，我国环保设备的水平仅相当于国外工业发达国家20世纪70年代中期水平（部分达到20世纪80年代水平）。主要产品达到国际当代水平的不到4%，达到20世纪80年代水平的占20%，达到20世纪70年代水平的占40%，还有35%的产品仅相当于国外20世纪60年代的水平。这些都加大了中国环境污染治理的难度。

环境保护是全民的事业，需要公众的广泛参与和配合，中国国民的环保意识虽然自改革开放以来有很大提高，但与环保事业的发展还不很适应。

现在中国开始开发西部。随着中、西部的开发，我国的环境污染将向中、西部扩散和延伸。中国目前还有几千万人口生活在贫困线以下，主要居住在中国中、西部的农村和偏远山区，而西部的生态环境本身很脆弱，怎样解决好经济、环境和社会的协调发展，避免在开发西部过程中以牺牲环境为代价，是我国政府和人民必须面对的一个实际问题。提高西部人民和全国人民的科学素养，提高人们的环保意识，是一个必不可少的环节。

4．环保资金投入的不足

对环境污染的预防和环境污染的治理，都需要资金投人。美国1970～1982年间用于污染防治的费用达5950亿美元（设备投资3250亿美元，运转费2700亿美元）。日本购买“公害”防治设备的费用占国民生产总值的2%。荷兰国土上填埋的危险化学废物约800万t，大多数都在往外渗漏金属毒物，清除这些填埋场地的污染需要耗资32亿～56亿美元。德国已经登记的有问题的废物处置场地3.5万多处，预计改造费用至少需要100亿美元。1999年我国城市生活污水年排放量为201亿t，要处理这些污水，按处理污水1t/d的建设投资约1500元计，处理5500万t/d污水的建设投资约825亿元。

我国目前环境污染状况大致相当于发达国家污染最重的20世纪50～60年代的水平，环境污染已造成严重经济损失（见表2-9），但环保投人比例一直偏低，“七五”期间，防治环境污染方面的投人资金约占国民生产总值（GNP）的0.7%，“八五”期间投资比例也低于1%。“九五”期间，环境污染治理（不含造林绿化等生态建设）投资4500亿元（其中，新扩改建项目投资2000亿元，老污染源治理投资1050亿元，城市环境基础设施建设投资1450亿元），约占同期GNP的1.3%，这是中国在环境方面投人比例首次超过1%。而且有限的投人主要安排在大城市，“治理”办法之一是在检查考核时间内使部分污染严重的企业停产。

发达国家如英国、德国、日本等的环保投资自20世纪70年代以来一直都高于1%。研

究表明，环境保护的投入占 GNP 的 2% 才能减缓环境恶化过程。为了停止这一过程，投资比例应增加到 6%。要全面迅速地恢复生态环境，投入比例应为 8%～10%。这对经济刚刚得到复苏的中国来说，是难以承受的，但适当提高环保投资不会对经济增长速度产生明显影响。根据 1995～2000 年中国发展模型的研究，中国的环保投入占 GNP 的比例提高到 1%～1.5%，GNP 每年只会降低 0.06%，而带来的收益是每年可以减少至少 1000 多亿元的污染损失，同时还能带动中国环保产业的发展。

表 2－9　1999 年、2000 年中国环境污染与破坏事故情况

年份	环境污染与破坏事故次数，次	按事故类型分，次					污染直接经济损失 万元	污染事故赔、罚款总额 万元
		水污染	大气污染	固体废物污染	噪声与振动危害	其他		
1999	1614	888	582	80	40	24	5710.6	2116.3
2000	2411	1138	864	103	266	40	17807.9	3682.65

注：资料来源：2000 年、2001 年中国统计年鉴。

5. 中国对环境问题的认识较晚，重视程度不够

20 世纪 50 年代至 60 年代，环境问题已引起发达国家的重视。但中国那时正在“大炼钢铁”，“大跃进”和“文化大革命”，甚至把环境问题看成是资本主义的特有产物，认为社会主义不存在环境污染，结果丧失了机会，使环境问题积重难返。意识到中国环境污染问题严重性的周恩来总理，派代表参加 1972 年在瑞典斯德哥尔摩召开的环境会议，并在北京召开了第一次全国环境会议（1973 年 8 月）。这是我国环保事业的开始。由于各方面因素，环境问题一直没有真正得到重视。1998 年的特大洪水给我国造成 2000 亿元的损失，自然界又一次敲响警钟：遭到破坏的生态环境会“报复”人类。但除了宣传其实并不是以人为本的“人在堤在”的“生死牌”等“抗洪精神”，强调洪水百年不遇以外，中国领导层和民众是不是还有必要深刻反省一下人为因素造成的损失在其中所占比例？专家指出，长江上游森林生态系统遭受长期持续的严重破坏和长江中下游湖泊湿地面积的大幅度减少是 1998 年洪水的两个主导因素。1980～1983 年、1992～1996 年专家考察了从宜昌到重庆之间长江沿岸，发现 880 多 km 江段两岸 80% 以上的原生植被已荡然无存。千湖之省的湖北，20 世纪 50 年代有 1066 个湖，总面积 $8300km^2$，占全省总面积 20%，是全球同纬度地区面积最大的湖群。至今仅存 300 个，面积不足 $2656km^2$，20 世纪与 50 年代相比锐减了 70%。洪湖在 1954 年的特大洪水期间，曾承担分洪水量多达 160 亿 m^3，而现在洪湖的面积仅剩下 50%，只能调蓄 3.9 亿 m^3 水量，只是 1954 年的 1/40，而且沼泽化正在吞食着这片湖泊。

“三北防护林”工程已建设多年，但我国北方，尤其是北京春天的沙尘爆近年来有增无减。这些问题虽有专家多次提出，但目前还没有有力的措施加以治理。

五、人类解决环境问题的对策

1. 加强环境标准和环境法规的制定和执行力度

环境标准是为保护环境和有利于生态平衡，对环境中污染物的容许含量和污染源排放污染物的数量和浓度等所作的技术规范。环境标准是伴随着环境问题的产生而出现的。英国于 1863 年制定了《碱业法》，规定了工厂排放的硫酸、二氧化硫、氯化氢等大气污染物的排放量。日本从 1949 年起，在东京都、神奈川县、福冈县等先后制定了公害防止条例和限制污染物排放的规定。20 世纪 60 年代以来，工业发达国家因环境质量日趋恶化，也开始制定了

一系列环境质量标准；国际标准化组织（ISO）从1972年开始制定基础标准和方法标准，以统一各国环境保护工作中的名词、术语、单位和取样、监测方法等。为消除由于各国、各地区、各组织制定的法律、法规和标准的不统一及各自实施一套标准和审核办法的问题，消除将环保纳入贸易所形成新的贸易壁垒的问题，1992年，国际标准化组织第207技术委员会（ISO/TC207），组织制定了ISO 14000环境管理体系系列标准。到目前为止，已发布了关于环境管理体系、环境审核、环境标志、环境表现评价、生命周期评价和术语等14项国际标准。2001年，第32届世界标准日的主题是：环境与标准。

我国自20世纪80年代以后，从国情出发，为了防治污染，保护环境，制定了"经济建设、城市建筑和环境建设同步规划、同步实施、同步发展"，"实现经济、社会和环境效益相统一"的方针，实行"预防为主"、"谁污染，谁治理"、"强化环境管理"三项环境政策（但"谁污染，谁治理"的提法，似乎忽略了国家在污染治理方面的作用），以此为环境保护立法、执法和守法的基本准则。截至2000年底，我国共颁布环境和资源保护法律15部，行政法35件，地方性法规、规章1000条；累积颁布各类环境标准439项（其中国家环境标准365项，国家环保总局标准74项）。截至2001年6月，制定各类国家环境标准样品231个。

我国环境质量标准和污染物排放标准不如发达国家严格，标准化工作主要侧重在环境质量标准，污染物排放标准和水、气、声、渣的监测方法等领域，对于污染防治标准、环保设备国产化、成套化等方面的标准的制订力度还不大。

2．实行环境影响评价制度

随着环境问题的日益严重，发达国家首先开始了环境影响评价方面的研究。1969年美国率先在国家"环境政策法"中将环境影响评价以法律的形式固定下来，标志着环境保护由过去被动的污染治理转变为以预防为主的全面综合治理。之后，瑞典（1970）、新西兰（1973）、加拿大（1973）、澳大利亚（1974）、马来西亚（1974）、德国（1976）、菲律宾（1977）、印度（1978）、泰国（1979）、中国（1979）、印尼（1979）、斯里兰卡（1979）等国先后建立了环境影响评价制度。进入20世纪80年代，世界上多数国家都明确提出，政府部门在制定对生态环境有相当影响的方案和实行重要计划、批准开发建设项目时，必须首先编写环境影响报告。20世纪90年代以来，环境影响评价更加关注跨国跨区的全球性环境问题，更加趋于规范化和深入，许多高新技术（如中子活化分析技术、遥感与系统分析技术等）应用于环境领域，提高了环境影响评价的质量。

3．推行清洁生产

对于工业社会所带来的污染，最开始采取的措施是"稀释排放"，到20世纪中期，采取的措施为"末端治理"。与"稀释排放"相比，"末端治理"是一大进步。从20世纪50年代至70年代，"末端治理"也很快显出其局限性，因为"末端治理"只是一种"头痛医头、脚痛医脚"的被动治理还击功能污染的方式，不能防治污染的产生，更不能从根本上解决污染问题。"清洁生产"便逐渐成型问世。清洁生产是原料与能源利用率最高、废弃物产生和排放量最低、环境污染最小的生产方式与过程，是在环境保护战略上主动预防的新观念，即强调在产品的生产过程中减少污染物的产生，而把末端治理作为一种辅助手段。

1976年，"无废工艺和无废生产国际研讨会"在巴黎召开，标志着清洁生产正式列入人类议事日程。1992年，在巴西里约热内卢召开的世界环境与发展大会上，清洁生产作为实现可持续发展战略的重要手段，被列入《21世纪议程》。之后，许多国家相继出台有关措施、政策，一些国际组织也大力推进清洁生产。

多年来，国际上对“清洁生产”无统一定义，世界各国同时使用着一些同义词，如污染预防、少废无废技术、无废工艺、清洁技术、废物最小化、源削减、源控制等。1989 年，联合国环境规划署（UNEP）巴黎工业与环境中心总结各国经验，提出了清洁生产的定义：“清洁生产是指将综合预防的环境策略，持续应用于生产过程和产品中，以便减少对人类和环境的风险。”其涵义是：（1）对生产过程与产品采取整体预防性环境战略，以减少对人类和环境可能造成的危害；（2）生产过程应节约原料与能源，尽可能不用有毒原料，减少有害物质排放，降低其毒性；（3）对产品，通过其生命周期分析，使其从原料直至产品最终处置过程中对环境的影响降至最低；（4）清洁生产必须籍可行技术、改良技术等先进实用技术或改变企业文化来达到。概括地说，清洁生产主要包括以下四个方面：第一，清洁能源即常规能源的合理利用、可再生能源的利用、新能源（无污染、少污染）的开发和节能技术。例如，煤应向高效率和洁净化燃烧的方向发展，图 2－1 是煤的洁净燃烧的示意图。如图 2－1 所示，以分区脱硫、分级送风解耦等方法，使煤燃烧后排放物为 N_2、O_2、H_2O 和 $CaSO_4$，而不再污染环境。第二，清洁生产过程，即不用或少用有毒有害原料和中间产品（用无污染、少污染的原材料替代毒性大、污染严重的原材料），回收利用原料和中间产品；不产生有毒有害的副产品和中间产品；采用高效率设备（消耗少、效率高、无污染和少污染），改进操作步骤，使生产过程排放的废弃物和污染物最少，物料利用率最高；加强工厂管理，等等。第三，清洁产品。产品本身无毒无害；产品在制造过程、使用过程以及使用后，不危害人体健康和生态环境；产品寿命提高，使用后易于回收、再生和重复使用等。第四，低费高效处理。对于少量必须处理的污染物，采用低费用、高效率的处理设备进行最终的处理与处置。

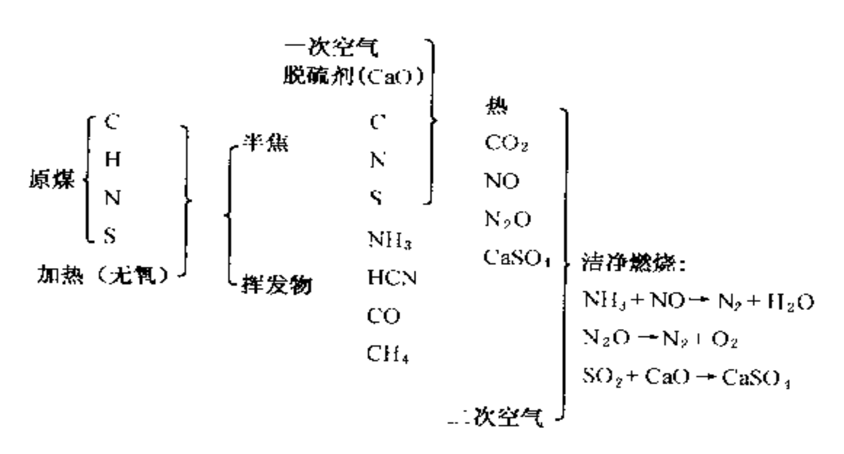


图 2－1　煤的洁净燃烧示意图

（资料来源：王佛松等：展望 21 世纪的化学，化学工业出版社，2000 年）

推行清洁生产已经成为世界各国实现经济、社会可持续发展的必然选择。只有推行清洁生产，才能在保持经济增长的前提下，实现资源的可持续利用，不断改善环境质量。对产业部分来说，转向清洁生产是实施可持续发展战略的标志。我国政府制定的《中国 21 世纪议程》中，已将推行清洁生产作为一项重要内容，作为实施可持续发展的一项重要措施。

4. 发展循环经济

循环经济的本质在于，把人类社会的生产方式看成人类与自然界之间的物质能量交换，虽然在人类的生产消费中产生废弃物，但所谓废物乃属于这种物质能量交换循环中的一部分

能量流，是另一种形式的资源，废物作为资源被利用，废物治理作为一种产业在开发，通过对废物的减量化、资源化、无害化处理，使得经济的循环运行模式，不仅发挥保护环境，消除污染的作用，而且能推动资源保护，促进新兴产业发展。循环经济是把清洁生产和废弃物的综合利用融为一体的经济，要求运用生态学规律来指导人类社会的经济活动。

20世纪80年代以来，综合污染控制作为一种新的环保方法，日益受到发达国家关注，其特点是对各种形式的污染和各环境因子实行整体、系统的控制，克服传统环保方法对污染进行分散、个别的控制，因而忽略各种形式的污染之间、各环境因子之间的联系和互动的缺陷。从而形成一整套系统的以避免废物产生为特征的机制。循环经济遵循所谓的3R原则，即减量化（Reduce）原则、再使用（Reuse）原则、再循环（Recycle）原则。图2-2是城市垃圾分类收集一步清运系统。垃圾的分类收集和分别处理，提高垃圾的资源价值，并减少废弃物处理量和二次污染。

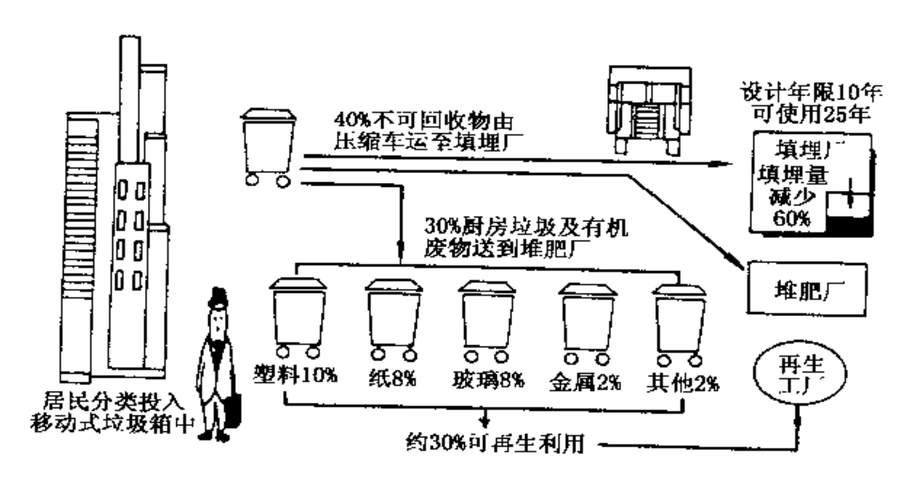


图2-2　城市垃圾分类收集一步清运系统

（资料来源：杨永杰等：化工环境保护概论，化学工业出版社，2001年）

城市垃圾分类收集一步清运系统（图2-2）特点：

（1）机械化倾倒，减少人力，降低劳动强度；（2）回收大量垃圾资源；（3）压缩运输，减少人力和运输费用；（4）降低填埋费用，延长填埋场使用年限，减少填埋污染；（5）运输过程中无二次污染。

依照循环经济的理念，在资源生产和消费领域，设计出三种不同维度的循环模式：（1）企业内部的循环，促进原料和能源的循环利用；（2）企业之间的循环，组织生态工业链，把不同的经济组织联结起来，形成共享资源和互换副产品的产业共生组合，使一家的“三废”成为另一家的原料和能源；（3）社会整体循环，大力发展绿色消费市场和资源回收产业，在整个社会范围内，完成“自然资源—产品和用品—再生资源”的闭合回路。

各国都通过法律手段积极推进“绿色管理”，实现废弃物减量化、资源化、无害化，推行循环经济的理念。1986年德国制定《废物管理法》，强调要通过节省资源的工艺技术和可循环的包装系统，把避免废物产生作为废物管理的首要目标。1991年，德国首次按照资源-产品-资源的循环经济理念，制定《包装条例》，规定生产商和零售商对于用过的包装，首先应避免其产生，其次要对其回收和利用。1996年，德国又颁布《循环经济和废物包装法》，从包装推广到所有的生产部门。在《循环经济与废物法案》中规定，每年总计产生超

过2000t以上废物的制造者，必须对避免利用、消除这些废物制定一个经济方案，包括：需要利用和消除的危险废物的种类、数量和残留物；说明已经采取和计划采取的避免、利用和消除废物的措施；说明何种废物缺乏利用性而必须进行消除及其理由。美国1976年通过《资源保护回收法》，1990年通过《1990年污染预防法》，提出用污染预防政策补充和取代以末端治理为主的污染控制政策。日本制定的《废弃物处置法》规定，"生产者应当努力对伴随其事业活动而产生的废弃物加以再生利用，以减少废物的排放量，同时，在产品的制造、加工、销售过程中，应当考虑所制造、加工、销售的产品及容器在变为废弃物时，不会使它们的恰当处理变得困难。"国外一些著名的跨国公司已经实施绿色管理，如世界上最大的化工企业——美国杜邦公司，任命专职主管环境事务的经理，负责指导和协调遍布全球各公司的废弃物回收清理工作，并利用废旧产品为原料生产新产品。日本的富士公司对废旧胶片的循环利用率达到100%，NEC公司每年回收3000t报废计算机和电器。我国由于观念、技术等因素的限制，对废弃物回收利用还没有效机制。

5. 可持续发展

可持续发展的概念最早是在1980年提出，直至1987年世界环境与发展委员会向联合国提交的《我们共同的未来——从一个地球到一个世界》的著名报告中给予明确："在不危及后代人满足其环境资源需求的前提下，寻求满足当代人需要的发展途径。"可持续发展的概念结束了长期以来把发展经济与保护环境和资源相互对立起来的错误观念，指出它们应当是相互联系和互为因果的。

可持续发展的内涵主要体现公平性原则、连续性原则和共同性原则。公平性原则主要包括三个方面：一是当代人的公平，二是代际间的公平，三是公平分配有限的资源。持续性原则要求人类对于自然资源的耗竭速率应该考虑资源与环境的临界性。持续性原则的核心是强调：人类经济和社会发展不能超越资源和环境的承载能力。共同性原则强调可持续发展一旦作为全球发展的共同目标而定下来，对于世界各国所表现的公平性和持续性原则都是共同的。实现这一总目标必须采取全球共同的联合行动。

中国作为一个发展中国家，深受人口、资源、环境、贫困等问题的困扰。联合国环境与发展会议之后，中国政府重视自己承担的国际义务，积极参与全球可持续发展理论的建设和工作。中国可持续发展战略的总体目标是：（1）用50年时间，全面达到世界中等发达国家的可持续发展水平，进入世界可持续发展能力前20名行列。（2）在整个国民经济中科技进步的贡献率达到70%以上。（3）单位能量消耗和资源消耗所创造的价值在2000年基础上提高10－12倍。（4）人均预期寿命达到85岁。（5）人文发展指数进入世界前50名。（6）全国平均受教育年限在12年以上。（7）能有效地克服人口、粮食、能源、资源、生态环境等制约可持续发展的瓶颈。（8）确保中国的食物安全、经济安全、健康安全、环境安全和社会安全。（9）2030年实现人口数量的"零增长"。（10）2040年实现能源资源消耗的"零增长"。（11）2050年实现生态环境退化的"零增长"，全面实现进入可持续发展的良性循环。

6. 国际社会的广泛合作

多环境污染和生态破坏事件之后，人们逐渐认识到，人类只有一个地球，环境问题是没有国界的，环境问题的解决需要国际社会的广泛参与和合作。

1972年，在瑞典首都斯德哥尔摩召开了第一次人类环境会议，113个国家的1300多名代表出席，大会通过了《联合国人类环境会议宣言》(《斯德哥尔摩宣言》)。宣言郑重告诉人们："如果人类继续增殖人口，掠夺式地开发自然资源，肆意污染和破坏环境，人类赖以生

存的地球，必将出现资源匮乏，污染泛滥，生存破坏的灾难。”在宣言中呼吁各国政府，为保护和改善人类环境，造福全体人民，造福后代而共同努力。1992年6月，联合国环境与发展大会在巴西里约热内卢召开，有183个国家参加，102个国家元首或政府首脑出席会议。会议通过了《里约环境与发展宣言》、《21世纪议程》和《关于森林问题的原则声明》等文件。

1972年起，成立了许多的国际环保组织，专门研究和处理人类环境问题。另外，许多民间的非政府环保组织也纷纷成立，在保护全球生态环境、普及环境教育、推动全球环境保护合作等领域发挥着重要的作用。如我国的“自然之友”、“北京地球村”等。

国际社会经过协商，签订了各种国际环保公约与协定书。据统计，全球目前有180多个环保公约（表2-10是部分国际环保公约）。另外还确定了许多的环境日，开展宣传活动，以唤起和增强人们的环境意识。表2-11是与环保有关的节日，表2-12是每年世界环境日主题。但是，发达国家与发展中国家在环保方面始终存在分歧，关键是发达国家与发展中国家在保护环境问题上的义务、责任问题。

表2-10　部分国际环保公约

环保公约名称	签订地点	年份
长途运输所造成的跨国界的空气污染	日内瓦	1979
降低硫的跨国界污染，目标至少30%	赫尔辛基	1985
对一氧化碳排放及跨国界流动的控制	索非亚	1988
保护臭氧层	维也纳	1985
破坏臭氧层的物质	蒙特利尔	1987
预防由于船舶和飞机倾倒废料对海洋造成的污染	奥斯陆	1972
预防船舶造成的污染（MARPOL）	伦敦	1973
波罗的海地区的环境保护	赫尔辛基	1974
湿地尤其是鸟类栖息地的湿地的重要性	RAMSAR	1971
欧洲野生动植物包括它们的栖息地的保护	伯恩	1979
防止地球温暖化的气候变化框架条约	里约热内卢	1992
京都议定书	京都	1997
预防来自陆地污染源对海洋的污染	巴黎	1974

表2-11　与环保有关的节日

日期	环境日名称	日期	环境日名称
2月2日	世界湿地日	7月11日	世界人口日
3月12日	中国植树节	8月9日	世界土著居民国际日
3月21日	国际消除种族歧视日	9月16日	保护臭氧层国际日
3月22日	世界水日	9月27日	世界旅游日
3月23日	世界气象日	10月4日	国际动物日
4月的某一周	全国各地的爱鸟周	10月14日	国际减灾日
4月22日	世界地球日	10月16日	世界粮食日
5月31日	世界无烟日	10月17日	根除贫困国际日

续表

日　期	环境日名称	日　期	环境日名称
6月4日	受侵略戕害无辜儿童国际日	10月24～30日	裁军周
6月5日	世界环境日	11月16日	国际宽容日
6月17日	世界防治荒漠化和干旱日	11月11～18日	国际科学与和平周
6月25日	中国土地日	12月29日	生物多样化国际日
6月26日	国际禁毒日		

表2－12　每年"世界环境日"的主题

年　份	"世界环境日"的主题
1974	只有一个地球
1975	人类居住
1976	水：生命的重要源泉
1977	关注臭氧层破坏、水土流失、土壤退化和滥伐森林
1978	没有破坏的发展
1979	为了儿童和未来——没有破坏的发展
1980	新的十年，新的挑战——没有破坏的发展
1981	保护地下水和人类的食物链，防治有毒化学品污染
1982	纪念斯德哥尔摩人类环境会议十周年——提高环境意识
1983	管理和处置有害废弃物，防治酸雨破坏和提高能源利用
1984	沙漠化
1985	青年·人口·环境
1986	环境与和平
1987	环境与居住
1988	保护环境、持续发展、公众参与
1989	警惕全球变暖
1990	儿童与环境
1991	气候变化——需要全球合作
1992	只有一个地球——齐关心，共同分享
1993	贫穷与环境——摆脱恶性循环
1994	一个地球，一个家庭
1995	各国人民联合起来，创造更加美好的未来
1996	我们的地球、居住地、家园
1997	为了地球上的生命
1998	为了地球上的生命——拯救我们的海洋
1999	保护地球就是保护我们的未来
2000	环境千年行动起来

第二节　大气圈生态环境问题

一、大气层概述

地球表面被主要由氮（N_2）和氧（O_2）组成的气体混合物组成的大气层包围，并受地球引力作用，随地球旋转。大气的总质量约为 5×10^{15}t，占地球总质量的百万分之一。地球半径约为6370km，而大气质量的一半集中在接地5km以内，99%左右在30km之内，大气层厚度约1000～1400km。大气温度随高度的变化，大气层一般分为几个层（见图2－3）：

1. 对流层

是大气贴近地面的最低部分，其厚度随纬度和季节而不同。在赤道附近（夏季）为16～18km；中纬度地区为10～12km，极地附近（冬季）为8～9km。对流层的上限称为"对流层顶"，其高度变化约在8～17km之间。由于贴近地面的空气受地面辐射热的影响，对流层中的温度是上冷下热，热空气上升而冷空气下降，形成强烈的对流。对流层的温度随高度升高而降低，大约每上升1000m，温度降低5～7℃。中纬度区域对流层顶温度为－55～－50℃。由于温度差异，对流层中有明显的对流，这是对流层最重要的特征。其次，对流层中大气的密度大，其质量约占大气层的4/5。大气中的水分子主要集中在对流层中，随气流的垂直对流和水平的移动，形成风、雨、雪、雾等各种大气现象。尤其在近地1～2km范围内的大气，受地形、人类活动的影响，局部气流运动更为复杂多变，大气污染主要发生在这一层，所以对流层与人类活动的关系最密切。

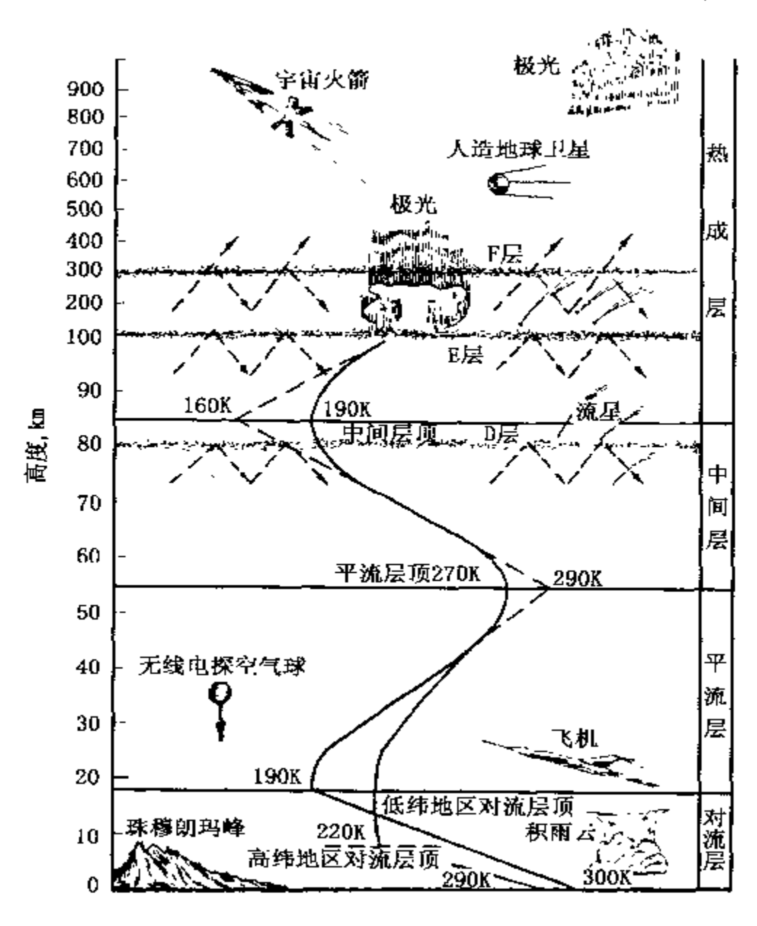


图2－3　大气的垂直分层

2. 平流层

从对流层顶到上空约50km的大气称为平流层。平流层有两个特点：一是在15～35km高度有一臭氧层，最大浓度出现在20～30km高度处。由于臭氧（O_3）能强烈吸收太阳短波紫外线，使得该层温度随高度升高而增加，是造成约50km高度处温度出现最高值（约为0℃左右）的原因，该处称为平流层顶。二是大气主要是水平移动。另外，该层大气比对流层稀薄得多，尘埃和水蒸气很少，大气现象很少发生，是超音速飞机理想的飞行区域。

3. 中间层

从平流层顶向上，温度随高度的增加又迅速下降，这个区域称为中（间）层。在约85km高度，温度降到最低值－100℃左右，这个高度称为中层顶。气流在该层的垂直方向有强烈的对流运动。中间层和平流层含有全部空气质量的1/5。

4. 热层

中间层向上随温度再增加，大气温度迅速升高，直到800km左右，这一层大气叫做热层。在500km高处，温度为400～2000℃，日变化500～800℃。热层中的大气分子比中间层更稀薄，在太阳紫外线和高能宇宙线作用下，大多数分子发生电离，变成带电离子和自由电子，所以又叫电离层。电离层能够反射无线电波，可以进行远距离无线电通讯。

5. 散逸层

散逸层也称外逸层，是在电离层的上面（800km以上）大气层的最外层，这里大气极其稀薄，受到地球引力极小，气体质点可以自由扩散到宇宙空间去。大气圈的顶部（1000km以上）没有明显界限，逐渐过渡到宇宙空间。

综上所述，大气圈的最下层，即邻近地面的是对流层，大气污染主要发生在这一层，并受地形和人类活动的影响较大。大气圈是地球上生命支持系统中最重要的部分，因而也是生态环境问题最关注的区域。与之有关的是全球气候变化问题、臭氧层问题、大气污染问题等。以下分别对这些问题予以说明和讨论。

二、全球气候变化问题

全球气候变化问题实际上是两方面的问题：一是由于人类活动使大气层中的CO_2含量增加产生的“温室效应”使大气层温度升高的评价问题；另一方面是太阳对地球的辐射的变化对大气层温度影响的评价问题。

1. “温室效应”及“阳伞效应”

“温室效应”是大气中某些微量气体，主要是二氧化碳（CO_2，在大气中的体积百分数目为0.033%或330ppm，其总量约2.3×10^{12}t）和水蒸气，通过吸收太阳辐射中的红外线使大气层温度升高。但CO_2和水蒸气并不吸收可见光，因而可见光的大部分能穿过大气层到达地面，在地面被吸收后，相当一部分又以红外线的形式向大气层辐射，这些红外线（波长为13～17μm）再次被大气层中的CO_2及水蒸气吸收，并通过这种吸收延缓地球表面及大气层中的热量向宇宙空间弥散的过程。因此，一方面温室效应对地球上的生命活动是必要的，另一方面，温室效应失衡将会恶化生态环境。

对于大气层中由于CO_2增加引起的温度变化，早在1896年，瑞典化学家S·阿仑尼乌斯根据在地表上CO_2及水蒸气浓度不同的地点的红外辐射量的实测资料计算得出，当大气中的CO_2增加一倍时，地表平均温度将上升5～6℃；若大气中的CO_2浓度减少一半，地表温度将降低4℃；若大气中CO_2浓度为零时，则大气的平均气温将下降20℃（应该说，这是最早的“温室效应”的正演模型）。近年来有研究结果表明，若大气层中没有任何能产生温室效应的气体，则地球表面的温度将下降33℃。可以想象，若没有温室效应，地球上的生命现象将是另外一种情景。

与“温室效应”效果相反的是大气中由于灰尘（如火山爆发后产生的烟尘等）或SO_2等的聚集形成气溶胶，气溶胶能阻隔太阳辐射，即有“阳伞效应”，其效果是使大气的温度降低。但是气溶胶无法在大气层中长期存在，从全球来看，气溶胶的释放也不可能达到由于化石燃料燃烧而每年排放CO_2总量为220亿t的规模。因此气溶胶的“阳伞效应”无法抵消

"温室效应"的影响。据某些计算模型预测，到2010年，全球平均气温将上升1～3.5℃。由于气温升高使冰山融化，将使海平面上升15～95cm，另外降雨的空间和时间模式也会有所改变。

2. 大气圈中的CO_2含量变化

人类对大气成分的直接测量始于20世纪的50年代。近年来根据对南极地区冰心的研究，已大体查明近200年来，即工业革命200年以来，大气中的CO_2增加了约80ppm，即工业革命前大气中的CO_2含量约为280ppm，到20世纪90年代大气层中CO_2含量已增加到353ppm。表2－13是大气层中CO_2含量的变化。另据1958年以来观测到的资料表明，大气中CO_2排放量为220亿t/年，即以每年0.4%～0.5%的速率增加，预计未来50～100年内，大气中CO_2含量将增加一倍，相应的地表的平均温度将增加2℃。人类活动排放的CO_2中，发达国家的排放量占75%，其中美国的排放量占全球排放量的23%，是世界第一排放大户。

表2－13　大气层中CO_2含量的变化

年　代	大气中CO_2含量，ppm
1958	315
1972	330
1980	341
1994	357

注：根据夏威夷群岛上Maunaloa岛上空高4711m处的观测资料；
另据对南极冰川地区冰心的测定，在14～16万年前的冰期中，大气中CO_2含量为180～200ppm，在温暖期（8～14万年前）为280～300ppm。

3. 有"温室效应"的其他气体

大气中CO_2是使气温升高的最主要气体（在大气中CO_2的寿命为100年，其对温室效应的贡献约为65%），另外还有近40种微量气体也能使大气的温度升高，即也有产生"温室效应"的作用。这些微量气体主要有沼气（CH_4）、氧化二氮（N_2O）、氟氯烃（FCKW或CFC）。沼气来源于生物体的发酵及焚烧、石油及石油制品中的逸出。从17世纪初到现在沼气在大气中的含量从0.7ppm，上升到1.8ppm，沼气在大气中的寿命为10年，1个沼气分子的温室效应作用相当于32个CO_2分子的作用。氧化二氮是从土壤中的腐殖质分解而生成的，大气中氧化二氮的含量在240年前为0.28ppm，现代为0.31ppm，N_2O在大气中的寿命为150年，1个N_2O分子的温室效应作用相当于200个CO_2分子的作用。氟氯烃是人工制造的气体，在大气中的寿命为60～400年，其温室效应作用比CO_2大1.5万倍，因此现在正发展各种新材料来代替氟氯烃。

4. 太阳辐射问题

应注意的是，从20世纪80年代以来，太阳对地球的辐射以每年0.2%的速率减小的趋势是否随太阳黑子活动的约11年周期而改变。近年来的研究表明，从现在到2030年，由于太阳辐射以每年0.2%的速率减弱，将使气温下降0.1℃，而地球上的火山活动产生的烟尘引起的"阳伞效应"，也会使气温下降0.18℃，但人类活动使气温增加的幅度明显大于自然变化引起的气温下降，即能使气温增加0.90℃。综合自然和人类活动两方面的因素，到2030年气温将增加0.62℃。由此可以看出人类活动对气温变化的作用日渐明显。

5. 若干观察案例

世界上海拔最高的青藏高原是对全球环境变化最敏感的地区，青藏高原人员稀少，人类活动对地区环境的影响有限，尤其是对湖泊的影响有限，因而全球气候变化对环境、尤其是对大气温度的升高和湖泊的影响更为直接。

据中国科学院兰州高原大气物理研究所对青藏高原及其邻近地区165个气象台站近30年来气象资料的分析发现，在同一季节，海拔500m以下区域，每10年大气温度平均增加0℃，海拔500～1500m区域内平均增加0.11℃；海拔1500～2500m区域内平均增加0.12℃；海拔2500～3500m区域内平均增加0.19℃；海拔3500m以上平均增加0.25℃；即海拔高的区域，气温升高更为明显。在同一海拔高度上，则是秋、冬季气温的增加比春、夏季明显。另据我国科学工作者近年的调查发现，由于全球气温升高、湖水蒸发作用加强及近几十年来降雨量的减少，青藏高原的湖泊萎缩，如青藏高原北部的可可西里地区的苟仁错（藏语中“错”为湖泊之意），1990年湖面面积还有23.5km^2，水深1.3m以上，1999年，已完全干涸，原湖面为一层部分结晶的饱和卤水。高原东北部的另一湖泊——兴错，20世纪60年代湖面面积为3.3km^2，20世纪90年代末已退化为面积2km^{2}的沼泽。

另据日本名古屋大学研究人员对尼泊尔境内喜马拉亚山脉海拔在5000m以上的8条冰川的多年观察，发现进入20世纪90年代以来冰川的融化速度加快，其中全长1700m、名为AX010的冰川，在1978～1991年间，平均每年缩短0.71m，1991～1996年期间，平均每年缩短1.14m。应该说这是全球气候变暖的证据。

在世界其他地区也观察到由于气候变暖而引起冰川的融化。在南美洲秘鲁境内的安第斯山脉，从20世纪70年代初到20世纪90年代末，由于气温升高，已有110万m^{3}的积雪融化。蒂克里奥冰川海拔4818m，几十年来，每年后退10m，20世纪90年代末，冰川已经融化殆尽，仅有少部分地区被冰雪覆盖。在南极，“拉森B”及威尔金斯冰原在南极半岛的东部及西南部，从20世纪50年代起，冰原开始融化，1998年共有3000km^{2}冰层脱离“拉森B”及威尔金斯陆缘冰原，相当于在此前10～15年所损失的冰层面积的总和。还有研究结果表明，北极海上的冰层近年来由于气候变暖而减薄了40%。

6. 大气层的变化对生态环境的影响

全球气候的变化对生态环境的影响涉及野生动物习性的变化，对农作物产量的影响，对海陆关系及气候变化的影响，以及对人类生存条件的影响。

1）对动物种群的影响

全球气候变暖使野生动物习性发生变化，20世纪以来已发现北半球一些动物由于气候变暖，其活动范围向北迁移、繁殖期提前。从20世纪60年代末到90年代初，英国南方鸟类的活动区域平均向北迁移了19km。此外还发现欧洲的蝴蝶向北迁移。美国的亚利桑那州是墨西哥坚鸟的筑巢产卵时间，1998年比1971年提前了约10d。

全球气候变暖还会对人类的生存带来影响。这些影响有直接的和间接的，近期的和长期的。较为直接的是，气候变暖会使某些传染病的媒介（蚊蝇类、细菌、病毒）的分布区域发生改变，即向高纬度及高海拔区域扩展，使疫区扩大，发病率上升。另外与水体有关的传染病（如霍乱等）也会因气候变化使水系的变迁，水面分布的改变以及传染病的媒介的繁殖、生存条件改变而有所增加。预计到2050年由于气温升高引起的疾病发病率和死亡率将比现在增加一倍。

2）对农作物及生长季、耕作制的影响

气候变化对人类生存较间接的影响是气温和降雨量的变化对农作物产量的影响。但气候变化确实对我国的农业耕作制度发生过重大影响。例如长江下游双季稻栽种的可靠记载始于唐代（公元618～907年，唐高祖武德元年至哀帝天祐四年），唐玄宗开元十八年（公元731年），仅扬州就有双季稻180000亩。这与当时处于温暖湿润的气候条件有关（见后）。唐以后的五代及宋代（公元907～1227年，后梁太祖开平元年至南宋末帝宝义二年）气候变冷，江南双季稻几乎绝迹。史载："宋时江南，又止一收"。明代（公元1368～1663年，太祖洪武元年至南明定武十八年）江南的双季稻种植经历了由盛而衰的过程：15世纪末至16世纪，由于气候温暖，长江下游双季稻种植的区域的北界到了苏北的泰州、扬州、六合一代。17世纪中叶，中国气候快速变冷，进入"小冰期"为近300多年来最寒冷的时期，使长江下游的双季稻种植几乎停止。直到18世纪初清雍正时期（公元1723～1735年，雍正元年至十四年）气候转暖，江南双季稻种植普遍，以至一度出现"谷贱伤农"。19世纪初中国气候又开始变冷，以苏南为例，春季比18世纪末晚9d。1820年前后，林则徐任苏南道台时，提倡在苏南种双季稻，因气候寒冷，未能成功。19世纪后半期，中国气候进一步变冷（小说《老残游记》中对济南附近黄河冬季的描写可见一斑），苏南的双季稻再次绝迹。进入20世纪以来，中国处在明清以后的温暖时期，双季稻广泛种植。长江下游，包括苏北，已是一年两熟的种植区域。预计从现在到2050年，由于全球平均气温将增加1.2℃，我国一年三熟及一年两熟制的区域将扩大，而一年一熟制区域将缩小。三熟制区域的北界将从长江流域北移到黄河流域。表2－14为从现在到2050年各种熟制耕地面积所占比例的变化的预测结果。

表2－14　2050年我国耕地种植熟制变化预测

单位：%

种植熟制	现有面积比例	2050年预计比例	变化率
一年一熟制区域	62.3	39.2	－23.1
一年两熟制区域	24.2	24.9	＋0.7
一年三熟制区域	13.5	35.9	＋22.4

从表2－14可见，气温升高对农业生产，尤其是北方的农作物生长是有好处的。但也会由于气温升高，水的蒸发加快以及耕作熟制的改变而使水耗加大，又会使北方缺水的状况更趋严重。

有研究表明，我国2050年年平均温度将比现在高1.4℃，降雨量将比现在增加4.2%，主要是冬季降雨（雪）量有所增加。还有研究表明，就气候变化对农作物生长的影响而论，在种植方式和耕作技术不变的条件下，气温的升高对玉米的产量影响最明显，年平均气温升高1℃，东北大部分地区的玉米产量将增加9.6%（降雨增加10%时）至11.2%（降雨量不变时）（以80年代的产量水平为参考值，以下同）。在年平均气温升高1℃时，冬小麦将增产5%（降雨量不变时）至5.8%（降雨量增加10%）。而对水稻的影响最小，年平均气温升高1℃时产量增加0.8%（降雨量不变时）至0.7%（降雨量增加10%）。即使年平均温度增加2℃，水稻产量仅增加1.6%（降雨量不变）至1.55%（降雨量增加10%）。就对农作物的生长季节而论，秋季气候的变化对产量的影响最大。就区域而论，气候对北方农作物产量的影响大于南方。其中降雨的影响因地区、作物及生长阶段不同而异。

全球气候变化对人类生存环境更长期的影响是，由于气温升高导致的陆地沙漠化，草原退化，以及海平面升高产生的耕地面积减少和沿海土地的盐渍化问题。

关于今后全球平均气温变化的预测问题，各种研究结果略有区别。其中全球变化政府间小组（IPCC）1995年的第二个研究报告表明，到2025年，全球平均气温将升高1℃，到2050年全球年平均气温升高1.2℃，到2100年将升高3～3.5℃。相应的，2025年和2100年，全球的海平面将升高10cm和94cm。2001年1月，该组织发表的第三个研究报告认为，到2025年全球平均气温将升高1.4℃（比1995年预计的1℃要高）；到2100年，全球平均气温将升高5.8℃（比1995年预计的3.5℃要高）。但海平面升高仅是2025年升高9cm和2100年升高88cm。1999年6月，美国皮尤全球气候变化研究中心的研究报告认为到下世纪末，全球气温将比现在升高1.3～4.6℃，并将导致海平面比现在升高17～99cm。国内专家认为，到2100年全球年平均气温将增加1～3.5℃。农业气象方面的专家认为，2000年到2010年，中国的年平均气温仅增加0.2℃（人类活动使气温增加0.55℃，太阳辐射减弱及火山活动影响使气温降低0.35℃，综合结果气温升高0.2℃）；降雨量变化约1%。

全球气候变化政府间小组在2001年的研究报告中还指出：20世纪"可能"（其概率值为0.66～0.9）是过去1000年来最温暖的100年，20世纪90年代则"很可能"是1861年以来最暖的10年（其概率值为0.90～0.99）。由于全球气候变暖，过去40年内，全球的雪域面积"很可能"（概率值为0.90～0.99）已经减少10%。从2001年开始已经观察到的冰川融化现象还将继续，中期内（50年左右）某些地区频繁发生的夏季持续干旱、降雨量严重偏离常年均值、洪涝灾害频繁等气候变化还会增多。

三、臭氧层问题

1．臭氧

臭氧是由三个氧原子组成的氧的同素异性体，分子式为O_3，为淡蓝色有刺激性味的气体，有极强的氧化作用，而且有毒。在地表附近通常在雷电后及电气设备附近，由于电火花使氧分子O_2分解成两个氧原子O，氧原子再与氧分子结合成为臭氧分子，当空气中臭氧的浓度达到0.0001%时，即可闻到其特殊气味。当空气中臭氧的浓度达0.03ppm时，在8h内部分对臭氧敏感的农作物及树木会受伤害；空气中臭氧浓度为0.2～0.3ppm时，人的肺功能降低，并拌有胸部紧缩感；臭氧浓度达1～2ppm时，2h内肺活量减小，肺部慢性中毒并有胸痛；浓度达5～10ppm时，发生肺气肿，伴有全身疼痛，开始出现麻痹。但在大气层中存在的少量臭氧能防止太阳的紫外线辐射对地面生物体的不利影响。紫外线会使细胞核中的染色体分解，从而使细胞的增生停止。紫外线对人体的危害是损害细胞核的脱氧核糖核酸，使皮肤受到灼伤，甚至诱发皮癌。

2．臭氧层

大气层中的臭氧是由于太阳的紫外线辐射而生成的，也由于臭氧对紫外线的吸收而破坏。通常，波长小于242nm的紫外线能将大气层中的氧O_2分解为两个氧原子，氧原子再和氧分子结合为臭氧O_3。臭氧又会由于受到波长小于300nm的紫外线辐射而分解。这样在大气层的上部，由于紫外线的作用而产生臭氧，又由于对紫外线的吸收而分解，这样的循环，使太阳的紫外线辐射的相当大部分在大气层的上部被吸收，从而保护了地表附近的生物免遭紫外线辐射的伤害。大气层中的臭氧含量极少，但能在大气层的上部形成臭氧层，如果把整个垂直大气柱中的臭氧压缩成海平面的气压，则只能形成几个mm厚的臭氧气层。在地球的大气层中，臭氧层的分布是不均衡的。在空间分布上，在地球的两极附近，臭氧层底部的高度仅13～15km，而且臭氧含量较高，这是极地型臭氧层分布。在中纬度地区，臭氧层底部高度约19～21km，臭氧含量中等，这是温带型臭氧层分布。在赤道附近纬度30°～35°以内，

臭氧层底部的高度为24～27km，这是热带型臭氧层分布。除上述三种类型的分布外，还存在一种混合型分布，即在极地及中纬度地区，在冬季或春季，当极地的气团入侵时，在19～21km及11～14km两个高度上，同时出现臭氧分压的极大值。在时间分布上，在极地和中纬度的温带，臭氧含量在春季较高，极大值出现在3月；而8～10月为极小值。在赤道附近，臭氧含量的极大值出现在夏季，而在12～1月份为极小值。

3．人类活动对臭氧层的影响

氮氧化物（NO_x）、氯氧化物（ClO_x）、氢氧化物（HO_x）将会分解及破坏臭氧。人类活动造成臭氧破坏的途径是：(1) 航空器（飞机）在平流层中飞行使氮氧化物（NO_x）增加，并导致臭氧的分解。但由于目前飞机飞行高度多数低于12km，因此并不会对臭层有明显的破坏。(2) 地面人类活动致使氮氧化物（NO_x）增加，化肥（氮肥）的使用，石油及石油制品作为燃料使用都会产生大量氮氧化物，从而使从地表施放到大气层上部的氮氧化物增加，并因此使臭氧的分布发生改变。

氟氯烃（CFC）及哈龙等消耗臭氧层的物质（ODS）的使用使臭氧减少。氟氯烃是甲烷或乙烷中的部分或全部氢原子被氟原子或氯原子取代后的产物，其商品名称为氟里昂（Freon）。从20世纪30年代，氟氯烃发现以后，由于其化学性质安定，无毒，因而广泛的用作致冷剂、喷雾剂、溶剂。氟氯烃虽然在大气层底部不分解，但是上升到大气层上部的平流层后，在紫外线作用下会分解为有催化作用的氯原子，这种氯原子能产生使臭氧分解为常规氧气的连锁反应，每个氯原子能破坏1万个臭氧分子。几十年来，由于大量使用氟氯烃，使在平流层中的臭氧减少，在南极上空，臭氧层周期性的出现空洞，臭氧的含量也比正常值降低40%～50%。有研究结果认为，按全球的平均情况，仅进入平流层的二氯氟甲烷（CFC—11）及二氯二氟甲烷（CFC—12），将消耗掉臭氧层中约2%的臭氧。若按1977年世界使用的氟氯烃量继续使用氟氯烃，而且没有其他手段使其消除，则臭氧层中的臭氧将减少4%，甚至30%。1974年全世界氟里昂产量达80万t，1986年全球ODS物质消耗量达100万t。因此南极上空的臭氧层空洞最大时面积达2720万km^2，使一些人类居住的区域直接暴露在紫外线辐射下。

4．臭氧减少对人类及地球的影响

1）对生物及人类的影响

大气层中臭氧的减少会使波长为280～320nm的紫外线辐射增强，并对生物体造成伤害。理论计算表明，地表紫外线辐射增加的百分数是大气中臭氧总量减少百分数的2倍，即若大气层中臭氧总量减少2%，地表紫外线辐射将增加4%。这将使部分农作物（豆类、瓜果类）的产量及品质下降，并会使海洋浮游生物和浅海鱼类减少。由于过强的紫外线辐射对人的眼角膜和皮肤造成伤害：会诱发白内障及眼内水晶体变形；有研究表明，平流层中的臭氧减少10%，全世界白内障的发病率将增加6%～8%，因白内障而造成的失明人数将增加10～15万人。过强的紫外线还会增加恶性皮肤瘤的发病率，臭氧浓度下降10%，恶性皮肤瘤的发病率将增加26%。另外过强的紫外线辐射还会使人体皮肤内的免疫功能下降。

2）对气候的影响

由于臭氧对紫外线的强烈吸收，使平流层的温度增加，从而影响平流层的温度结构和高空的大气环流。理论计算表明，若大气中臭氧总量减少15%，则在40km高空处臭氧的浓度将减少45%，由于在这一高度上臭氧减少而使大气层对紫外线吸收的减少，这一高度上的局部温度可能下降10℃。此外，氟氯烃分子的温室效应作用要比CO_2分子大1.5万倍。按

1977 年全球施用氟氯烃的水平，将使地面平均温度上升 0.5℃，这对全球平均温度的影响是明显的。

5. 保护臭氧层的计划和措施

由于人们对臭氧层的破坏和大气层中臭氧总量减少所带来危险的关心与日俱增，20 世纪 70 年代末，美国、加拿大和斯堪的纳维亚国家协议在气溶胶喷雾剂中禁止使用氟氯烃；1985 年通过保护臭氧层的维也纳公约，1987 年通过"关于耗损臭氧层物质的蒙特利尔议定书"，1990 年通过上述议定书的修正案（伦敦），缔约的 92 国承担义务在 1995 年使氟氯烃的生产和消费减少 50%，1997 年减少 65%，2000 年完全淘汰氟氯烃的生产。协议书还规定给经济较不发达的国家以 10 年的宽限；协议书及其修正案还规定，2005 年淘汰甲基氯仿，还规定了淘汰几十种对臭氧层有害的化学物质的时间表。

1995 年诺贝尔化学奖授予三位大气环境化学家 M.Molina（墨西哥）、S.Rowland（美国）和 P.Crutzen（荷兰），就是因为他们首先提出了平流层臭氧破坏的化学机制，Crutzen 提出 NO_x 理论（1970），Rowland 和 Molina 提出了 CFCs 理论（1974）。这些基础理论的研究成果导致对南极"臭氧洞"的发现（1985），从而引起了全世界的"震动"，并导致《蒙特利尔议定书》的签订（1987），为保护全球环境作出了重大贡献。

第三节　大气污染问题

一、大气化学组成

大气层的范围很广，在离地上千千米的高空中还能找到痕量的大气。但是，与人类活动关系最密切的，仅是与地面直接相连高度为 12km 以内的大气对流层；受地形影响和对人类活动的影响最大的，是距地表 2km 以内的大气层。

大气是多种气体的混合物。表 2－15 是大气的化学组成及其背景值，背景值来自地球自然资源的释放、火山爆发、海洋有机体分解和氧化、森林失火等。

表 2－15　大气组成及其背景值

成　分	体积百分数	成　分	体积百分数，ppm
N_2	78.09%	Kr	1
O_2	20.94%	H_2	0.5
Ar	0.93%	N_2O	0.25
CO_2	0.032%	CO	0.1
Ne	18ppm	O_3	0.002
He	5.0ppm	SO_2	0.001
CH_4	1.3ppm	NO_2	0.001

水蒸气是低层大气中的重要的组分，浓度变化很大：干燥地区可低至 0.02%，温暖潮湿地区可达 6%。在各种天气现象的形成和污染化学过程中起重要作用。

按各种化学成分停留时间（T_x）长短，大气可分成四类：

非循环气体（惰性气体）：$T_x > 10^7$ 年，其浓度在大气中很少变化，无循环。

生物循环气体（氧和二氧化碳）：$T_x = 10^6$ 年～几年，$T_x < 10$ 年的气体浓度随时空变

化。

水蒸气和短寿命气体：T_x 从几天到几十天，其浓度随时、空会有很大变化。

气溶胶粒子：如海盐、土壤粒子、有机粒子、烟微粒、浊雾（NH_4SO_4、NH_4NO_3），T_x 约 1～30d。

二、大气污染物的分类

大气污染物从物理形态可分为气态（约占 90%）和气溶胶（约占 10%）；从形成过程可分为一次污染物和二次污染物；从化学组分和物理形态综合考虑，可分为 8 类（见表 2－16）。

表 2－16　大气污染物分类

污染物	一次污染物	二次污染物	污染物	一次污染物	二次污染物
含硫化合物	SO_2，H_2S	SO_2，H_2SO_4，MSO_4	碳氢化合物	C_1—C_5 化合物	醛、酮、酸
含氮化合物	NO，NH_3	NO_2，HNO_3，MNO_3	光化学氧化剂		O_3，PAN，H_2O_2
卤素化合物	HF，HCl	无	微粒物质	多环芳烃，重金属毒物	H_2SO_4，MSO_4，MNO_3
碳的化合物	CO，CO_2	无	放射性物质		

三、大气污染物的来源、转化和归宿

1. 硫化物

大气中含硫化合物有：H_2S、SO_2、SO_3、H_2SO_4、SO_3^{2-}、SO_4^{2-}、有机硫气溶胶。其中最重要的是：H_2S、SO_2、H_2SO_4、SO_4^{2-}。H_2S 在对流层的背景浓度为 0.002～0.02ppm（10^{-6}）；SO_2 为 0.002～0.01ppm；SO_4^{2-} 约 2μg/m³。硫化物的来源是：矿物燃料的燃烧（煤的含硫量大约为 0.5%～6.0%）；有机物的分解和燃烧（沼泽地、稻田、大陆架等地排放出的 H_2S）；海水的浪花（SO_4^{2-}，10%落在陆地上）；火山爆发等。

1）硫化氢（H_2S）

大气中硫化氢主要是土壤和沉积物中微生物活动的产物。H_2S 在大气中不稳定，能很快氧化为 SO_2。大气中 80% 的 SO_2 由 H_2S 转化而来。H_2S 被 O、O_2、O_3 氧化。与 O_3 的反应是最重要的氧化反应，该反应在均匀的气相中速度很慢，但在大气微粒表面上能以较快速度进行。当大气中含 0.05ppm 的 O_3 和 15000 个微粒/cm³ 时，1ppb（10^{-9}）H_2S 寿命估计为 2h。当有 200 个微粒/cm³ 时，其寿命约为 28h。由此可见，大气中的颗粒可加速 H_2S 的转化。H_2S、O_2、O_3 均能溶于水，因此在雾或云滴中 H_2S 氧化速度很快。

2）二氧化硫（SO_2）

SO_2 是最重要的含硫大气污染物。来源主要有四：含硫矿物燃料（煤和石油）的燃烧，是最重要的人为源，约占总排放量的 80%；消耗含硫原料的工业过程（如金属矿熔炼和石油精炼）；火山爆发，是 SO_2 的重要天然源；天然源排出的 H_2S 转化为 SO_2。目前，我国 SO_2 排放量列世界第一。长期在低浓度 SO_2 污染的大气中，可引起鼻炎、咽喉炎、支气管炎等。

SO_2 进入大气后，氧化成 SO_3，SO_3 溶于水滴中形成 H_2SO_4，当大气中存在 NH_4^+ 或金属离子 M^{2+} 时，转化为 $(NH_4^+)_2SO_4$ 或 MSO_4 气溶胶。在该过程中，SO_2 氧化成 SO_3 是关键一步。SO_2 氧化成 SO_3 有两类重要的途径——催化氧化和光化学氧化。

SO_2 的催化氧化。在清洁空气中，SO_2 氧化为 SO_3 速度缓慢，但在电厂的烟气中，SO_2 的氧化速率比在清洁空气中高 10 到 100 倍。这与有催化剂存在时，SO_2 在水中的氧化反应相似。某些过渡金属离子（主要是 Fe^{3+}、Mn^{2+}、Cu^{2+}、Co^{2+} 等）常以微粒形式悬浮于空气中。当湿度很高时，这些微粒成为凝聚核或形成液滴。SO_2 和 O_2 被这些液态气溶胶吸收，并在液相中反应生成硫酸。反应在碱性及中性条件下较快；酸度变高时，SO_2 的氧化显著变慢，SO_2 在空气中的停留时间加长。然而在大气中若存在足够的 NH_3，能加快 SO_2 的氧化进程，保持适当高的相对湿度，是保证 SO_2 在液相中进行催化氧化反应的必要前提。

SO_2 的光化学氧化。波长小于 290nm 的太阳辐射到不了地球表面，波长 285nm 处，SO_2 有最大吸收，而对波长大于 340nm 的辐射吸收很弱。SO—O 键解离能估计为 135 kcal/mol，相应于波长 218nm 的辐射。而在低层大气中不可能得这一波长的辐射。所以，SO_2 吸收太阳辐射后产生初级光化学过程是形成两个激发态，生成激发态 SO_2 分子，而不是直接解离。在 290nm 以上，SO_2 的吸收光谱有两个带，即波长在 384nm 处的弱吸收，此吸收使 SO_2 转变为第一激发态（三重态，用 $^3SO_2$ 表示）；第二个是波长在 294nm 处的强吸收，此吸收使 SO_2 转变为第二激发态（单重态，用 $^1SO_2$ 表示）。在城市 SO_2 光氧化反应中，主要是以三重态 $^3SO_2$ 存在。大气中 SO_2 光氧化为 SO_3 的机制，主要基于两个激发态 $^1SO_2$、$^3SO_2$ 与其他分子的反应。首先是 $^3SO_2$ 可以被其他的大气物种淬灭而返回到基态 SO_2，SO_2 再和其他物质（如 N_2、O_2、CO、CO_2、CH_4 等）发生反应。其中 SO_2 和 O_2 反应生成 SO_3 和 O 可能是 SO_2 光氧化形成 SO_3 的最重要的一步。

在清洁空气中，由光化学氧化引起的 SO_2 转化的典型速率约为 0.1%/h，Sidebottom 等指出，SO_2 光氧化最大的理论速率约为 2%/h。表 2－17 列出了 SO_2 在干净空气中的光氧化速率。相对湿度提高，可加速 SO_2 的光化学转化；在被污染的大气中，即当空气中存在碳氢化合物（HC）和氮氧化合物（NO_x）时，SO_2 的光氧化速率可以显著提高。表 2－18 列出了空气中含有 HC 及 NO_x 时测得的 SO_2 光氧化速度。

表 2－17　SO_2 在干净空气中的光氧化速率

研究者	初浓度（SO_2），ppm	相对湿度	SO_2 的氧化速率，%/h
Gerhard Johnstone（1955）	5～30	32～91	0.102～0.198
Urone 等（1968）	10～20	50	0.084
Urone 等（1971）	1000	0	0.023
		50	0.028
Katz&Gale（1971）	32	0	0.28
		50	1.0

表 2－18　空气中含有 HC 及 NO_x 时测得的 SO_2 光氧化速度

研究者	初浓度（SO_2），ppm	碳氢化合物	SO_2 的氧化速度，%/h
Renzetti and Doyle（1960）	0.2～0.6	2—甲基—2—丁烯	48～294
Urone 等（1968）	15～21	正己烷	1.8～12
Wilson&Lavy（1970）	0～0.75	丁烯	1.5～30

研究美国洛杉矶光化学烟雾事件发现，SO_2 氧化速率可高达（5%～10%）/h，比直接光氧化过程快得多。经研究发现其氧化机制为：阳光作用下 HC—NO_x 反应体系产生的自由基如氢氧基自由基（OH）、过氧化氢基自由基（HO_2）、过氧化烃基自由基（RO_2）等，或者产生的强氧化剂氧气（O_3）、过氧化氢（H_2O_2）能将 SO_2 迅速氧化成 SO_3，进而形成 H_2SO_4 和硫酸盐。强氧化剂 O_3 和 H_2O_2 能较快地被云雾或雨滴所吸收，并可使 SO_2 氧化速率明显加快。

在海洋中，气态的 SO_2 与水作用生成液态的 SO_2，然后再与水作用生成硫酸或亚硫酸，其反应速率常数在 $k_1=1.6\times10^{-12}$到 $k_3=7.0\times10^{-2}$之间，而且可以推断只有在 pH≤2 时，SO_2 才会有较高的浓度。在 pH 值高时，SO_2 穿过边界层而进入海水，也有离子的穿过。当 pH=4 时，SO_2 进入水中的阻力降到最低值，这时阻力主要来自气区边界层，而在 pH=8 时，SO_2 容易离子化，一般天然水 pH 在 4～9 之间，所以天然水对 SO_2 的吸收的阻力主要来自气区边界层。pH<4 时，SO_2 难于离子化，阻力主要来自液区边界层。

由 SO_3 形成 H_2SO_4 和 SO_4^{2-} 包括以下过程：SO_3 和 H_2O 水合过程；H_2SO_4 和 H_2O、NH_3 等结合形成气溶胶核（$(H_2SO_4)_m\cdot(H_2O)$、$(NH_4)_2SO_4\cdot H_2O$）过程；气溶胶粒子成长过程。

综上，SO_2 在大气中的转化，从 SO_2 氧化为 SO_3 是关键，其转化机制随环境复杂多变：相对湿度高、同时存在微粒物质时，以催化氧化反应为主；相对湿度低、太阳辐射强时，以光化学氧化反应为主。而自由基的存在是 SO_2 转化速率加快的关键；在液滴中若存在强氧化剂 O_3 和 H_2O_2，则 SO_2 的氧化反应将迅速加快。SO_2 在大气中的最终归宿是转化为硫酸盐。

H_2S、SO_2 和 SO_4^{2-} 在大气中的寿命分别为小于 1d、小于 3d 和 1 周。硫化物的最终去除途径为：雨除（rainout）和冲刷（washout）；向土壤和植物中扩散；硫酸盐微粒的干沉降。

大气中 SO_2 排放量持续增加，会形成酸雨，我国的酸雨污染区已由西南等少数地区，扩展到长江以南、青藏高原以东的大部分地区以及四川盆地等。硫沉降量超临界负荷的面积为 210 万 km^2，占国土面积的 21.9%。我国酸性降水硫酸根与硝酸根的当量浓度之比大约为 64:1，SO_2 排放量与煤炭消耗量的相关系数达 0.96（1983～1995 年）。因此控制 SO_2 排放是控制酸雨的主要关键。1995 年，我国火电装机容量达 1.6 亿 kW，SO_2 排放量 830 万 t，约占全国的 35%，2000 年火电装机容量达 2.2 亿 kW，SO_2 排放量占全国的 50% 左右，2010 年火电装机容量可达 3.7 亿 kW，SO_2 排放量将占全国的 2/3 左右。20 世纪 90 年代，我国煤炭的 75% 用于发电。预计 2000～2010 年，我国 90% 的煤炭仍用于发电，因此，我国 SO_2 排放量控制重点应放在燃煤电厂。

2. 氮化物

氮的氧化物共有七种：N_2O、NO、NO_2、NO_3、N_2O_3、N_2O_4、N_2O_5，只有 N_2O、NO、NO_2 可测定含量。NO 和 NO_2 在空气中常一起分析，统称为氮氧化物，用 NO_x 表示。大气中重要的含氮化合物是 N_2O、NO、NO_2、NH_3、NO_2^-、NO_3^- 和铵盐。含氮化合物绝大部分最终转化为硝酸盐。而硝酸盐通过雨除、洗脱和干沉降等过程从大气中排除。表 2-19 是大气中主要的含氮化合物及其环境浓度和在大气中的停留时间。表 2-20 是 1999 年中国部分南北方城市氮氧化物浓度年平均值。

表 2-19 大气中主要的含氮化合物

化合物	来源	环境浓度	停留时间
NO	燃烧	1.0ppb① (以 NO_2 计)	5d
NO_2	燃烧和生物活动		—
NH_3	生物活动	6ppb	1~2周
NO_3^-	NO_2 转化	0.2μg/m³	—
NH_4^+	NH_3 转化	1.0μg/m³	2~8d

①1ppb = 10^{-9} (以下同)。

表 2-20 1999 年中国部分南北方城市氮氧化物浓度年平均值 单位：mg/m³

序号	北方城市	浓度	南方城市	浓度
1	北京	0.140	广州	0.113
2	太原	0.101	上海	0.100
3	乌鲁木齐	0.092	武汉	0.088
4	鞍山	0.075	杭州	0.072
5	石家庄	0.075	重庆	0.062
6	吉林	0.068	珠海	0.061
7	安阳	0.068	宜宾	0.061
8	焦作	0.066	南充	0.060
9	沈阳	0.065	乐山	0.057
10	徐州	0.065	合肥	0.055

注：资料来源：2000 年中国社会统计资料。

1) N_2O

N_2O 是无色、略带甜味而无毒的气体，与天然环境中的其他微量气体相比，其浓度较大 (0.25ppm)，主要由土壤和海洋中细菌活动等天然源产生。在大气中的停留时间约为 4 年。N_2O 似乎是 NO 的重要天然源。氮肥施用过量会导致 NH_3 挥发，反硝化过程中形成 N_xO (包括 N_2O、NO)。N_2O 是温室气体又能消耗平流层中的 O_3，破坏臭氧层。据联合国环境计划署 (UNEP) 1992 年报道，目前大气中 N_2O 的平均体积百分比浓度为 310ppb，每年平均上升 0.6~1.0ppb，或 0.2%~0.3%。但由于 N_2O 在低层大气中不活泼，不被看做污染物。

2) NO、NO_2

NO、NO_2 是最重要的含氮大气污染物。NO_x 的主要来源是矿物燃料的燃烧。在高温条件下 (约 1200℃ 以上)，大气中的 N_2 和 O_2 化合生成 NO_x，主要产物是 NO。该反应是吸热的，温度越高，NO 的生成率越大。适当的催化剂能加速反应进行。由于排出的废气有较高的浓度 (NO) 和温度，部分 NO 氧化成 NO_2，通常产生的 NO_2 量是 NO 量的 0.5%~10%。

NO 是一种无色、无臭、无味的气体。其天然源是由生物作用和燃烧过程产生的。在空气中，NO 能被 O_2 和光化学过程很快氧化为 NO_2。NO 与 O_2 作用生成 NO_2 则是很慢的。

大气中 NO 向 NO_2 的转化有三种途径：(1) 热化学反应。在通常的大气环境中，由于大气中 NO 浓度很低，速率常数只有 10^{-38} 数量级，所以热反应很难发生；(2) 光化学反应。在污染大气中，NO 能迅速氧化为 NO_2，即通过光化学反应机制进行；(3) 自由基链反应。

过氧化氢基自由基（HO_2）和过氧化烃基自由基是低层大气中 NO 的主要氧化剂，促使 NO 氧化的最重要的中间体是氢氧自由基（OH）。只要大气中有 OH 及 CO，就可使 NO 不断转化成 NO_2。OH 基可能主要从亚硝酸光解产生，也可通过 HNO_3、H_2O_2、O_3 光解产生。

NO_2 是红棕色的腐蚀性气体，有生理刺激作用和毒性，其气味阈值为 0.12ppm。NO_2，不易溶于水，容易侵入肺泡，破坏肺表面活性物质，使肺泡表面张力增大，吸引毛细血管内水分向肺泡内移动，使肺泡侵于水中，产生肺水肿。气管和肺泡分泌液中含有抗蛋白分解酶，可防御蛋白分解酶对肺泡的破坏作用。当吞噬细胞被破坏，释放蛋白分解酶增多时，就会穿破肺泡而引起肺气肿。NO_2 能降低能见度和使远处物体模糊不清。在城市上空出现的黄棕色浓雾，主要是由 NO_2 和气溶胶共同造成的。

NO_2 是城市大气中最重要的光吸收分子。在低层大气中，它吸收全部可见和紫外范围的太阳辐射。辐射波长＜420nm 时，NO_2 解离为 NO 和 O（NO—O 的键能为 73kcal/mol，相当于 400nm 辐射具有的能量）。辐射波长在 300～370nm 之间时，有 90% 的 NO_2 解离为 NO 和 O。辐射波长＞370nm 时，解离百分数很快下降；辐射波长＞42nm 时，NO_2 不发生解离。最重要的是，NO_2 在低层大气中，能强烈吸收波长≥290nm 的太阳辐射，而发生光解反应，导致产生 O_3 和其他氧化剂。这是形成光化学烟雾一系列链式反应的起始物，其中阳光是主要的引发剂。

NO_x 人为源主要是煤和石油的燃烧。采用液化石油气和压缩天然气替代汽油和柴油作汽车燃料，最大优点是可以减少一氧化碳（减幅约 80%～85%）、碳氢化合物（减幅约 50%～70%）和颗粒物的排放，但对 NO_x 的减排效果有限。北京市汽车 NO_x 排放占总量的 46%。使用天然气和液化石油气替代汽油只能分别降低 NO_x 排放量的 10% 和 5%，即使现有的大小公共汽车和出租车全部用气体燃料代替，全市 NO_x 的减幅也仅有 1.1%～2.3%。据模型计算，即使把所有的机动车都改为替代燃料，较乐观的估计，对 NO_x 空气污染指数超过Ⅳ级天数的减少幅度也不超过 10%，即对改善 NO_x 污染不会起到太大作用。因此要在短期内减少 NO_x 的排放量是不现实的。替代燃料车只是过渡型环保车，燃料电池车才是最终的绿色环保车。目前燃料电池公共汽车仅在加拿大和美国的几个城市示范。NO_x 的另一来源是高空飞行的飞机直接排放，特别是飞行高度 20km 的超音速飞机。

NH_3 不是重要的大气污染物，主要来自天然源：细菌分解有机废物中的氨基酸所产生。在许多气体污染物反应和转化中，它起着重要的作用。它和硫酸（H_2SO_4）、硝酸（HNO_3）和盐酸（HCl）作用形成铵（NH_4^+）盐，在大气微粒中 NH_4^+ 的化合物占有较大分量。

3. 卤素化合物

大气中最常遇到的卤素污染物有 Cl_2、HF、HCl、CCl_3F（氟里昂）、卤代农药和除莠剂等。表 2－21 是一些卤代烃衍生物及其用途。

1）氟化物

氟发现于 1813 年。高溶解度氟化物广泛存在于土壤、水体和动植物体内，是生物的必需微量元素。但当浓度超过一定的临界浓度时，成为对生物有毒的污染元素。排入大气的氟化物主要有氟（F_2）、氟化氢（HF）、四氟化硅（SiF_4）、氟硅酸（H_2SiF_6）。

环境中氟化物主要来源于钢铁、制铝、化学、磷肥、陶瓷、氟化工、砖瓦等工业和燃煤过程中排放出的含氟“三废”。工业过程排放的含氟“三废”主要是使用冰晶石（Na_3AlF_6）、萤石（CaF_2）、磷矿石（$3Ca(PO_4)_2CaF_2$）和 HF 的企业排放的。例如，电解铝以冰晶石为

电解质，以氟化钠（NaF）、CaF_2、三氟化铝（AlF_3）为添加剂，在高温下电解过程中产生HF和SiF_4气体及含氟粉尘，每生产1t铝要排放15kg HF、8kg氟尘、2kg SiF_4。磷肥工业以磷灰石（含氟1%～3.5%）为原料（含氟1%～3.5%），生产过程中含氟量的1/2～1/3成为SiF_4气体排出。我国有磷肥厂800个左右，每年磷灰石用量在300～400万t以上，年排氟量达10多万t。我国砖瓦生产排氟量每年至少50万t以上。在某些地区，由于地质异常也可引起氟污染。自然环境中氟异常主要在火山地区、含氟矿床区和干旱、半干旱的沙漠和草原地区。

表2-21　卤代烃衍生物及用途

烃类	卤代烃		用途
	衍生物	分子式与结构式	
甲烷	四氯化碳	CCl_4	生产CFC溶剂
	三氯氟甲烷	CFC—11：$CFCCl_3$	火箭燃料气溶胶
	二氯二氟甲烷	CFC—12：CF_2Cl_2	灭火剂
	溴三氟甲烷	Halon—1301：CF_3BrCl	灭火剂
	氯溴二氟甲烷	Halon—1211：CF_2BrCl	灭火剂
	氯二氟甲烷	HCFC—22：CHF_2Cl	制冷剂
乙烷	三氯三氟乙烷	CFC—113：$C_2F_3Cl_3$	溶剂
	二氯四氟乙烷	CFC—114：$C_2F_4Cl_2$	溶剂
	氯五氟乙烷	CFC—115：C_2F_5Cl	溶剂
	二溴四氟乙烷	Halon—2402：$C_2F_4Br_2$	灭火剂
	甲基—三氯甲烷	CH_3CCl_3	溶剂

注：摘自马光等：环境与可持续发展导论，科学出版社，2000，112页。

地壳岩石圈平均含氟大约为625mg/kg。酸性花岗岩中氟含量较高，含量变化在520～4550mg/kg。文献报道，世界土壤平均含氟量为200～620mg/kg。据中国环境监测总站对我国4093个不同土壤样品的测定，平均含氟量为478mg/kg，最小值为50mg/kg，最大值为3467mg/kg，95%的置信范围值为191～1012mg/kg。空气平均含氟为0.04～1.2ppb，陆地水体平均含氟0.1～1mg/L，植物平均含1～15mg/kg，海洋含氟0.4～0.9mg/L，陆地动物软组织含氟<5mg/kg，骨骼含氟1000mg/kg左右。

含氟废气进入大气中后，氟化物可直接转入水体、土壤，被动植物吸收，对环境造成污染。许多无机氟化物在空气中很快被水蒸气水解而转变为较难挥发的化合物，后者通过冷凝或形成晶核离开大气，如大量的工业污染物四氟化硅，在空气中和水气反应，形成水合氧化硅和氟硅酸。氟硅酸易溶于水和易被植物吸收，氟硅酸水溶液液面上一气相中还含有氟化氢、四氟化硅。许多工业中散发出的无水氟化氢，能很快和大气中的水气结合形成气溶胶或氟化氢雾。氟化氢和玻璃反应生成SiF_4，含水HF则产生氟硅酸。

有人估计，饲草对氟化物的富集最高可达20万倍，即生长在含1ppb氟化物空气中的植物能吸收积累到200mg/kg，使在大气中稀释的氟化物在植物的叶片积累。在污染区生长的植物含氟量几百mg/kg是很普遍的，有的可达几千mg/kg。

植物从土壤中吸收积聚氟化物的能力，随土壤的性质与植物品种而异，多从酸性土壤中吸收，在酸性土壤中，氟化物以NaF、KF（氟化钾）、HF等易溶物存在。

氟化物可由水体、植物通过食物链进入动物体内。据云南林学院环境保护组调查：滇池接纳磷肥厂含氟量为0.3～0.4mg/L的废水后，湖中的藻类含氟量为60～70mg/L，鲫鱼骨骼为50～100mg/kg，虾为200mg/kg。文献报导，在氟浓度为1ppb的空气污染区中生活3年后，牛骨骼中蓄积的氟浓度为500mg/kg，山羊为3000～4000mg/kg，比对照群高4倍。

氟化物污染往往是由于低浓度含氟空气的间接影响造成的，其中动、植物富集作用是一个重要环节。在人的骨骼、肌肉、血液、脏器中都有氟的存在（见表2－22），正常人体的含氟量约为800mg，80岁以上的老年人体中约为1350mg。

表2－22　人体中主要组织含氟量百分比

组织 人的类型	人体含氟量 mg	骨	牙齿	指甲	毛发	其他脏器
正常人，%	793	55.45	25.16	8.17	6.20	5.22
正常老年人，%	1344	65.65	21.05	6.63	5.40	1.27

考古发现，距今10万年前，山西省阳高县的“许家窑”人就患有氟斑牙。20世纪30年代，Churchill等证明氟斑牙与引用水中氟含量有因果关系。1932年Molar等人报告了瑞典冰晶石工厂工人的氟骨症。我国1930年就开始有地方性氟中毒的报道，世界上几十个国家都有报道。氟中毒病区分为饮水型、生活用燃煤污染型、天然食物型等几种类型。世界上大多数国家饮用水标准中，氟含量为0.7～1.7mg/kg。我国由于部分地区饮用水含氟量偏高，约有3500万人患氟斑牙和170万氟骨症病患者。大气氟污染对畜牧业的主要危害对象是牛、马、羊。20世纪70年代，我国包头市曾发生冶炼厂氟废气污染牧草，引起家畜大量发病。据统计，1973年包头市郊10万只牛羊中有7万只发病。牧区大气安全氟浓度为小于1.15μg/（dm^2·d）（石灰滤纸法），牧草含氟量30mg/kg为保护家畜的含氟基准值。气态氟化物（HF、SiF_4）具有很强的植物毒性，比SO_2毒性大20多倍，对作物生长和产量造成影响。桑蚕也是对氟化物极为敏感的动物，世界各地都曾发生过蚕氟中毒事件，轻者造成茧产量下降，品质下降，重者则粒茧无收。1929年意大利阿迪杰炼铝厂附近发现蚕中毒。日本1975年前，蚕氟中毒也相当普遍。我国首先在广东出现，随后江苏、浙江、山东、四川等省蚕茧主要产区，都先后出现过。杭嘉湖地区砖瓦厂烟道排放的氟，气态氟占90%以上，而尘态极少。不同土壤在砖瓦窑温度下释放氟的百分率70%～95%，大多在85%～95%以上。研究表明，杭嘉湖地区大气氟浓度控制在1.2μg/（dm^2·d）以下，就不会使桑叶氟含量大幅度增加而导致蚕氟中毒。桑叶临界氟浓度为30mg/kg。四川秀山、湖南保靖县的氟病为食品氟中毒。居民食用的玉米，熏烤过的氟含量是未熏烤过的10倍左右。熏烤过的辣椒中氟含量比未烤过的高40～50倍。当地煤样检测结果是含氟量为1325mg/kg。

研究认为，成人每天摄入氟以不超过4mg为宜，必须使饮用水氟含量＜1mg/L、空气氟含量＜7μg/m^3、食物氟含量控制在1～2mg/kg。

2）氯化物

含氯化合物主要有Cl_2、HCl、氯化烃的蒸汽、农药、除莠剂等。氯化烃的溶剂蒸汽包括氯仿（$CHCl_3$）、四氯化碳（CCl_4）、三氯乙烯（C_2HCl_3）、全氯乙烯（C_2Cl_4）、氟里昂（CCl_3F）等。

CCl_3F（氟里昂）是CCl_3F（氟里昂—11，即F－11）和CCl_2F_2（氟里昂—12，即F—

12）的总称。由于其化学性质稳定，沸点低，不着火和无毒性，已被广泛用作冷冻剂和气溶胶推进剂。由于其在化学上有强的抗降解性，高度挥发性和不溶于水，因此在大气层中停留时间可达40～150年，Molina和Rowland首先提出了氟里昂在对流层的排放，有可能导致平流层中臭氧层的损害。氟里昂在对流层中是化学惰性的，通过缓慢扩散过程最后抵达平流层，在平流层能被波长小于230nm的太阳辐射光解离成氯原子（Cl），形成的Cl原子通过ClO—Cl催化循环的链反应来消耗臭氧，一个氯氟烃分子分解的氯原子可以连续消耗数万个臭氧分子。不同的氯氟烃类物质对臭氧层的破坏力不一样，含氯原子多的破坏性有增强的趋势，不含氯原子的无破坏作用。目前臭氧的损耗约1%。另外，氯氟烃类物质有很高的“温室效应”，一个氯氟烃分子所造成的“温室效应”相当于一万个CO_2分子。由于氟里昂的“扩散”和“光解离”两过程都很缓慢，所以O_3减少量的最大值估计要发生在地平面释放出氟里昂的10年之后。

氟里昂唯一的去除机制是在平流层光解离形成Cl原子，Cl原子和甲烷（CH_4）反应生成HCl和CH_3，产生的HCl扩散回到对流层中，可被雨水冲刷除去。

1987年9月各国签订的《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》，提出了限制直至禁止使用CFCs的实施方案，1991年6月我国成为签约国。从2002年1月1日起，我国汽车空调将用非氟里昂制冷剂逐步取代氟里昂制冷剂，空调使用含氟里昂制冷剂的汽车将不得生产和进口，以减少对大气臭氧层的破坏。表2－23是新的《蒙特利尔议定书》规定的受控物质及参数。

表2－23　新的《蒙特利尔议定书》规定的受控物质及参数

类　别	化合物名称	分子式与结构简式	大气中的寿命 a	年排放量 kt	O_3破坏潜能 ODP	O_3去除百分比，%
A	CFC—11	$CFCl_3$	77	281	1.0	30.4
	CFC—12	CF_2Cl_2	139	370	1.0	40.0
	CFC—113	$C_2F_3Cl_3$	92	138	0.8	11.7
	CFC—114	$C_2F_4Cl_2$	180	低	1.0	低
	CFC—115	C_2F_5Cl	380	低	0.6	低
	Halon—1211	CF_2BrCl	12.5	3	3.0	0.9
	Halon—1301	CF_3Br	101	3	10.0	3.7
B	四氯化碳	CCl_4	76	66	1.0	7.6

注：摘自马光等：环境与可持续发展导论，科学出版社，2000。

4．碳的氧化物一氧化碳（CO）、二氧化碳（CO_2）

1）一氧化碳（CO）

除了CO_2以外，CO是低层大气中数量最多的气态污染物。矿物燃料不完全燃烧及汽车排放的废气中的CO约占人为源的80%，但人为排放的CO增加，并没有引起大气层CO浓度的增加。大气中甲烷（CH_4）被氢氧自由基（OH·）氧化，是最重要的天然源，天然源约为人为源的25倍。CH_4在低层大气中相当丰富，平均浓度约1.5ppm，全球产生量为9×10^{13}mol/年，平均停留时间为2.5年。CH_4与（OH·）反应速率常数为$1\times10^{-14}cm^3\cdot mol/s$，反应最终生成CO。叶绿素分解可得到高浓度的CO。此外，火山、天然气、森林火灾和海洋中的细菌作用也生成CO。城市中，CO的主要来源为汽车尾气，汽车的CO排放量取决于

车速，车速越高，CO 排放量越低。在公路隧道中汽车排放的 CO 容易引起中毒。1924 年美国匹兹堡市的 Liberty 隧道（1800m）就因交通堵塞发生 CO 中毒。

CO 在环境中的自然转化，在 1970 年以前还不清楚，现在已经查明，其转化有以下三种途径：其一，对流层中 CO 和 OH 的反应生成 CO_2 和氢自由基（H·），是 CO 排除的重要途径。在城市地区，根据该反应的速度常数及 OH 浓度，CO 在与土壤接触以前，通过这种方式约可以清除大气中 50% 的 CO。其二，向平流层迁移与（OH·）反应，这是 CO 迁出大气层的一个重要途径。这种转移受对流层顶的限制，与宇宙线、臭氧层和大气环流有关，Preseman 和 Warneck（1970）、Junge（1971）等分别估计 CO 在对流层的停留时间为 9 年和 2.7 年。其三，土壤中某些细菌能将 CO 转变为 CO_2 和 CH_4。在各种类型的土中，沙漠土吸收能力最小。土地若迅速贫瘠其吸收能力也明显下降，说明微生物对吸收 CO 起着重要作用。以此为基础 Inman 和 Inyessoll 估计土转移 CO 的容量为 12.5～59.1mg/（h·m^2）。

美国标准规定，接触 CO 的安全值是，接触 8h 的 CO 浓度为 9ppm，接触 1h 的 CO 浓度为 40ppm。根据观测，最繁忙街道上，CO 浓度多在 15～25ppm。但短时间（5min 以内）采样测定的结果，也可高达 120ppm。大气中 CO 浓度为 10ppm 时，会使血液内生成浓度＞2% 的碳氧血红蛋白（CO 与血红蛋白作用产物（Carboxy hemoglobin，简写为 COHb)。血红蛋白与 CO 的结合能力比与氧的结合能力大 200～300 倍。CO 浓度为 30ppm 时，COHb 的含量可略低于 5%，这时视觉、听觉器官的功能发生障碍。

2）二氧化碳（CO_2）

二氧化碳的天然来源包括海洋的释放、动植物的呼吸、植物体的燃烧、生物体腐烂分解等；人为源包括矿物燃料（煤和石油）的燃烧。大气中 CO_2 的浓度为 0.03%（体积比），总重量为 2.3×10^{12}t；根据 CO_2 在大气圈和水圈之间的交换平衡，估计海水中 CO_2 储存量为 1.3×10^{14}t，是大气中的 60 多倍。所以海洋和大气圈是 CO_2 的两大天然储存库。植物（水生、陆地）的光合作用、海洋吸收是大气层中 CO_2 排除的主要机制。

1950～1989 年间，中国的 CO_2 年排放增长率 8.72%，仅次于韩国。如果以 1973 年至 1989 年计算，则 CO_2 年排放增长率中国为 5.61%，次于韩国 7.19%，印度 6.68%、民主德国 5.66%。从 1986 年至 1991 年，中国已成为最大排放净增国。1990 年，中国占世界总排放量的 11%，仅次于美国和原苏联，但人均碳排放量为 0.544t/人，低于世界平均水平 1.15t/人。2000 年，中国 CO_2 排放量达到 31.9 亿 t，居世界第二位，占世界 CO_2 排放量的 14%，美国 54.7 亿 t，占世界排放量的 24%。

CO_2 和水蒸气允许太阳辐射（近紫外和可见光区，波长约为 300～700nm）通过而被地面所吸收，但 CO_2 和水蒸气能强烈吸收从地面向大气辐射的红外线，而使能量不向太空逸散。因此，CO_2 浓度增加会导致地表温度升高。有估计认为，燃烧矿物燃料，按 1960 年到 1976 年每年 5% 的增长率增长，到 2020 年大气中 CO_2 浓度将达 1860 年的两倍（约 600ppm），地球的平均温度将上升约 2.5℃。CO_2 对"温室效应"的影响详见第二章第二节。

3）碳氢化合物（HC）

碳氢化合物又叫烃，是各种含有碳和氢原子构成的化合物，烃中含有 O、N 等其他原子的衍生物也包括在内。城市地区的总碳氢化合物浓度，是指扣除 CH4 浓度或称为非甲烷烃类的浓度。从天然源和人为源排入大气的碳氢化合物（表 2－24 列举了碳氢化合物的各种来源），成分繁多，包括烷烃、烯烃、芳香烃、含氧烃等。

表 2-24 碳氢化合物的来源

来　　源	烃的年排放量 10^6t	占总量百分比 %
天然来源的 CH_4（稻田，沼泽，湿润的热带等）	1600	86.1
来自植物的萜烯（森林，耕地，草原等）	170	9.15
石油，煤和其他（石油的燃烧和蒸发、运输损失、溶剂蒸发等）	88.3	4.75
总量	1858.3	

烷烃是 CH_4 以外的其他的烷烃，最重要的是 C_2 ~ C_4，即乙烷、丙烷、丁烷等。

烯烃是一种不饱和烃，化学式为 C_nH_{2n}。烯烃的化学性质比烷烃活泼。最重要的烯烃也是 C_2 ~ C_4，乙烯对植物直接有害。在石油化工厂附近，常见到一些植物生长畸形，如本来直冲云霄的松树歪歪扭扭或横向伸展，这是石油分解出的一种产物——乙烯造成的。乙烯通过光化学反应能生成刺激眼睛的甲醛（HCHO），烯烃也是形成光化学烟雾的主要成分之一。

当双键的 HC 排列成环状的结构，基本单元是苯的分子称为芳香烃或芳烃。芳烃的化学反应能力介于烷烃和烯烃之间。有些芳烃（如多环芳烃（PAH））有致癌、致畸、致突变作用。在城市大气中，已鉴定出几种多核芳烃化合物对动物有致癌作用。广州市区的采样分析表明，约 50%～70%的 PAH 集中在粒径≤11μm 的颗粒物上。50%～70%的 PAH 能进入肺泡，95%～98%的 PAH 可进入呼吸道。

4）苯并芘

苯并［a］芘简写为 B［a］P，是黄色的针状或片状结晶，是有五环的多环芳烃类化合物，化学式 C_2OH_{12}。分子量 252，熔点 179℃，沸点 599℃，难溶于水，易溶于乙醚、环已烷等有机溶剂。在有机溶剂中，在波长为 360nm 的紫外光照射下，发出紫色荧光。虽然早在 1775 年就发现了煤烟和焦油会引起扫烟囱工人阴囊癌和皮肤癌的发病率高，但未查明具体的致癌成分。到 20 世纪 30 年代荧光分析法问世后，才从煤烟和焦油的混合物中分离出苯并［a］芘，1954 年从香烟中提取出苯并［a］芘，这是人类发现的第一种化学致癌物。

苯并［a］芘主要来源于矿物燃料的不完全燃烧。我国云南宣威地区肺癌发病率很高，原因是当地人在没有烟筒的室内烧烟煤，使空气中的 SO_2 和苯并［a］芘浓度过高。苯并［a］芘还是一切含碳燃料和有机物热解过程中的产物，当煤、石油在 800～1200℃供氧不足的条件下燃烧，苯并［a］芘产生最多。美国科学院报告指出，美国每年排出的苯并［a］芘的数量如下：火力发电站 500t；废弃物燃烧 600t；焦炭生产 200t；交通工具 20t。表 2-25 是各种烟气中苯并［a］芘的含量。

表 2-25 烟气中苯并［a］芘含量

来　　源	含　　量
焚化炉烟气	$4900\mu g/m^3$
煤烟	$67 \sim 136\mu g/m^3$
木柴烟	$62 \sim 125\mu g/m^3$
原油烟	$40 \sim 68\mu g/m^3$
汽油烟	$12 \sim 50.4\mu g/m^3$

续表

来　源	含　量
一般烟气	300μg/1000m³
汽车废气	2.5～12μg/m³
香烟烟气	0.32μg/包
烟丝烟	8～10μg/100g
城市空气	0.01～100μg/1000m³

还有报道认为，1kg燃料在燃烧过程中产生的苯并［a］芘量如下：煤67～136μg；石油40～68μg；木材40～68μg；汽油12～50.4μg。某些工厂周围1km内大气中的苯并［a］芘的浓度为：焦化厂0.13～57.8μg/100m³；冶炼厂0.87～3.06μg/100m³；炼油厂0.03～5.04μg/100m³；汽车每行驶1km排出苯并［a］芘1.35～17.89μg，飞机发动机每分钟排出苯并［a］芘8～10mg。伦敦大气污染严重时，苯并［a］芘的浓度曾达220μg/100m³；煤气厂、电厂空气中达18.0～7300μg/100m³，煤气厂蒸馏罐车间内达140～480μg/100m³，铝厂电解车间达20～40μg/100m³，炼油厂达5600μg/100m³。焦炉门密封不严时，炉顶苯并［a］芘含量高达6300μg/100m³。吸烟者每吸1mL烟，可吸入50亿烟尘粒子，而每支香烟燃烧可产生苯并［a］芘2～122μg。莫斯科炼油厂厂区内，土壤（干土）中苯并［a］芘含量高达191，400μg/kg，而莫斯科其他地区土壤中苯并［a］芘含量为79.3～346.5μg/kg。中国的公路多用沥青为基材，在太阳光和紫外线的长时间照射下，沥青路面会蒸发出大量的沥青烟气，沥青烟气中苯并［a］芘含量约占2.5%～3.5%。

大气中苯并［a］芘浓度变化范围约为0.01～100μg/1000m³，平均每人每年从大气中吸入约0.05～500μg。表2-26是我国一些地区大气飘尘中苯并［a］芘污染水平。

表2-26　我国一些地区大气飘尘中苯并［a］芘污染水平　　单位：μg/1000m³

城　市	清洁对照区	市　区	工业区
北京	0.24	4.70	11.45
南京	0.15	—	0.63

温度高于1200℃时，苯并［a］芘分解为水和CO_2，遇O_3和紫外线易被破坏。苯并［a］芘化学性质活跃，从烟气挥发出来后，在大气中很快冷凝，吸附在大气飘尘表面。土壤中，可被植物吸收而蓄积于植物体内。在实验性土壤中（150μg/kg干土）生长的紫苑和金莲花所含苯并［a］芘比对照组的高出6倍多。土壤中微生物可分解苯并［a］芘。自然条件下，翻耕土地使微生物的活动旺盛，一年后，土壤中苯并芘含量可减少80%～90%。

吸附在大气飘尘表面上的苯并［a］芘，易被人体吸入支气管和肺胞后，被肺胞和细支气管壁上的活性物质吸附长期滞留，会为其致癌作用提供条件。城市大气中污染水平每增加0.1μg/100m³，则肺癌的死亡率相应增长5%。苯并［a］芘还可致皮肤癌、胃癌。英国烟道清洁工人中，皮肤癌患者约占4%～10%。在阳光照射下，道路沥青会发出沥青烟气。在阳光下接触这种烟气数小时，1～2d后，皮肤暴露部位会发大片红斑和浮肿，感觉灼痛和瘙痒，长时间接触，少数人还会引起毛细血管扩张和皮肤萎缩，色素沉着，严重会引起皮肤癌。克纳尔曾利用0.25%苯并［a］芘的苯溶液涂抹小鼠以诱发皮肤癌，3个月后，在他自

已左臂下方发现肿瘤，诊断为鳞状上皮癌，这是苯并［a］芘最容易引发的癌症。德国资料表明，大气中苯并［a］芘浓度为 10～12.5μg/100m³ 时，居民肺癌死亡率为 25 人/10 万人；当大气中苯并［a］芘浓度为 17～19μg/100m³ 时，居民肺癌死亡率为 35～38 人/10 万人，两者的相关系数为 0.97。苯并［a］芘与 SO_2、NO_2、飘尘结合产生的危害作用更大，SO_2、NO_2 可能破坏呼吸道的屏障功能延长苯并［a］芘与呼吸道上皮细胞的接触时间。

冰岛胃癌死亡率居于世界第三位（次于智利、日本），男性胃癌患者约占全部男性癌症患者的 45%左右。这可能与当地居民食用含苯并［a］芘的烟熏食品有关：烟熏羊肉中苯并［a］芘浓度达 23μg/kg，海鸟中达 34～99μg/kg。在拉脱维亚，对一个沿海渔民点（有 3527 人）与邻近的农民点（5775 人）的调查表明，食物中的苯并［a］芘会导致消化道癌、呼吸道癌和皮肤癌（见表 2－27）。另外，研究表明，长链烃的表面活性剂可增强苯并［a］芘的致癌作用。

表 2－27　沿海渔民与邻近农民癌症患者统计结果（拉脱维亚）　单位：人/10 万人

癌症类型		渔　民	农　民
消化道癌		120	38
呼吸道和皮肤癌		96	35
其他癌		102	75
妇女	消化道癌	97	24
	乳腺、子宫、卵巢癌	87	97

5）二噁英

二噁英是多氯二苯对二噁英 PCDDs（Polychlorinated dibenzodioxin）及多氯二苯并呋喃 PCDFs（Polychlorinated dibenzofurans）的总称，是剧毒有机氯化物。二噁英较难分解，水中的溶解度较低，对热及光稳定。常温下 PCDD/PCDF 均为固体，难溶于水，易溶于脂肪，在生物体内积累，可引起皮肤痤疮、头痛、失聪、忧郁、失眠等。即使在很微量情况下，长期摄取也可引起癌症、畸形等。二噁英有很多异构体，PCDD 有 75 种异构体，PCDF 有 135 种异构体。不同的异构体毒性不同，以 2，3，7，8—四氯二苯对二噁英毒性最强，其毒性相当于氰化钾的 1000 倍。目前国际上以 2，3，7，8—四氯二苯对二噁英毒性为 1，其异构体的相对毒性用毒性等价系数（TEF）表示。表 2－28 是二噁英的国际毒性等价系数。

表 2－28　二噁英的国际毒性等价系数

PCDD 异构体	二噁英类国际毒性等价系数	PCDF 异构体	二噁英类国际毒性等价系数
2，3，7，8—TCDD	1	2，3，7，8—TeCDF	0.1
1，2，3，7，8—PeCDD	0.5	1，2，3，7，8—PeCDF	0.05
1，2，3，4，7，8—HxCDD	0.1	2，3，4，7，8—PeCDF	0.5
1，2，3，6，7，8—HxCDD	0.1	1，2，3，4，7，8—HxCDF	0.1
1，2，3，7，8，9—HxCDD	0.1	1，2，3，6，7，8—HxCDF	0.1
1，2，3，4，6，7，8—HpCDD	0.01	1，2，3，7，8，9—HxCDF	0.1
1，2，3，4，6，7，8，9—OCDD	0.01	2，3，4，6，7，8—HxCDF	0.1

续表

PCDD 异构体	二噁英类国际毒性等价系数	PCDF 异构体	二噁英类国际毒性等价系数
		1，2，3，4，6，7，8—HpCDF	0.01
		1，2，3，4，7，8，9—HpCDF	0.01
		1，2，3，4，6，7，8，9—OCDF	0.001

二噁英主要来源于一些化学物质的生产和使用，非铁废金属的冶炼，城市垃圾焚烧和有害废弃物的燃烧等。国外二噁英污染最早可追溯到1957年美国东部及中西部由于饲料中混入含二噁英的脂肪使大量雏鸡死亡。20世纪70年代，美军在越南进行化学战时散布的除草剂中就有微量的二噁英。

在日本，90%以上的垃圾采取焚烧处理。日本政府于1999年7月提出防治二噁英的法令，规定在2003年之前将其总排放量减少到1997年的1/10，焚烧炉排放废气中二噁英含量不得超过80mg/m^3。此后，已陆续有4600座小型焚烧设施停止使用，占全国垃圾焚烧设施的17%。这些设施的二噁英排放量大大超标，却又无力改造。

6）含氧烃

含氧烃主要是醛和酮两类。汽车尾气的含氧烃约占尾气中碳氢化合物总量的1.5%。大气中含氧烃的最重要来源，可能是大气中碳氢化合物的氧化和自由基的分解，醛的生成速率比酮要快得多。环境中总醛约有40%～60%是甲醛，甲醛和丙烯醛对人的眼睛都有相当强的刺激性。含氧烃是形成危害人体健康的光化学烟雾的主要成分。

5．光化学烟雾

光化学烟雾是指排放到大气中的NO_x和碳氢化合物，在阳光（紫外光）照射下发生光化学反应生成二次污染物（O_3和过氧化物等），参与光化学反应过程的一次污染物和二次污染物的混合物（其中有气体污染物，也有气溶胶）所形成的烟雾污染，称为光化学烟雾。光化学烟雾有特殊的气味，刺激人的眼睛，伤害植物的叶片。

光化学烟雾形成的条件是强阳光和低湿度，产生的刺激物浓度的高峰在中午或午后，在夜间消失。烟雾是氧化性的（臭氧含量很高），能使橡胶开裂。光化学烟雾呈浅蓝色，可使能见度降低。

1952年在美国加利福尼亚的洛杉矶首次出现光化学烟雾，后来在日本东京和墨西哥的墨西哥城等也发生光化学烟雾，至今仍是欧洲、美国和日本等国家的主要大气环境问题。1984年二十三届奥运会前夕，有一只准备参加开幕式的秃鹰突然毙命。解剖这只秃鹰的兽医宣布，这只鹰是患了光化学烟雾诱发的肺尘病，因血液中毒和血管破裂而亡。

我国城市大气污染目前主要是煤烟型污染，但早在20世纪70年代末就在兰州西固的石油化工区首次发现了光化学烟雾，1986年夏季也在北京发现了光化学烟雾的迹象，近10多年来日趋严重。随着经济的高速发展，我国中、南部特别是沿海城市均已发生或面临光化学烟雾的威胁，上海、广州和深圳都已频繁观测到光化学烟雾污染。一些大城市的空气污染已由煤烟型向汽车尾气型，或二者综合型转变，在石油化工区和机动车拥有量较多的大、中城市则是光化学烟雾污染容易发生的区域。1995年北京和广州大气中的NO_x平均浓度为0.123mg/m^3、0.129mg/m^3，分别为北方和南方城市之首。

汽车尾气是光化学烟雾污染的重要原因。汽车尾气通常产生的 NO_2 量是 NO 的 0.5%～10%。首先发现光化学烟雾的洛杉矶，有 600 多万人口，300 多万辆汽车，每月排放碳氢化合物 1000t，氮氧化物 400t。1997 年北京市有汽车 127 万辆，广州 90 多万辆，上海 80 多万辆，天津 60 多万辆。我国汽车排放量比日本、美国高 10～15 倍。另外，汽车在不同状态下运行，排放出的碳氢化合物和氮氧化合物量也不同（见表 2－29）。所以，交通管理部门可通过调整路况来使汽车处于少排放光化学烟雾污染物的状态。

另外，石油化学工业和氮肥工业排放出的废气和飞机尾气中的碳氢化合物和 NO_x 也可形成光化学烟雾。

表 2－29　不同状态下汽车排放碳氢化合物和氮氧化合物量

测定项目	空　挡	加　速	定　速	减　速
HC（乙烷），ppm	800	540	480	5000
HC 范围（乙烷等），ppm	300～1000	300～800	250～550	3000～12000
NO_2，ppm	23	543	1270	6
NO_2 等，ppm	10～50	1000～4000	1000～3000	5～50
乙炔，ppm	710	170	178	1096
醛，ppm	15	27	34	199
CO，%	4.9	1.8	1.7	3.4
CO_2，%	10.2	12.1	12.4	6.0
O_2，%	1.8	1.5	1.7	8.1
排气量，m/min	0.14～0.71	1.1～5.7	0.7～1.7	0.14～0.71
排气温度（消音器入口）℃	150～300	480～700	420～600	200～420
未燃燃料（乙烷等），%	2.88	2.12	1.95	18.0

光化学烟雾的形成机理于 1951 年 9 月在纽约召开的第十二次国际应用化学会议上首先提出：由于南加利福尼亚州的强阳光，引发了大气中存在的 HC 和 NO_x 之间的化学反应而造成的。光化学烟雾的形成过程很复杂，其中包括 242 个基元反应。

NO_2 是城市大气中最重要的吸收光的分子。大气中其他重要的吸收光的物质和不吸收光的物质见表 2－30。NO_2 吸收光辐射后分解为 NO 和原子氧（O），原子氧又很快与分子氧（O_2）发生反应生成臭氧（O_3），生成的 O_3 与 NO 反应生成 NO_2 和 O_2。

表 2－30　大气污染物中重要的吸收光的物质和不吸收光的物质

吸收光的物质	不吸收光的物质
O_2、O_3、NO_2、SO_2、HNO_3、$RONO_3$、$RONO_3$、硝基化合物、醛、酮、过氧化物、酰基亚硝酸酯、硝酸盐、微粒物质	N_2、H_2O、CO、CO_2、NO、SO_3、H_2SO_4、HC（烃类）、醇类、有机酸

光化学烟雾的形成是从 NO_2 的光解生成 O 的反应所引发，O 的生成导致 O_3 的产生。由于烃类的存在致使 NO 迅速转化为 NO_2，在此过程中，自由基（主要是 OH）起重要作用，以致不需要消耗 O_3 而能使大气中 NO 转化为 NO_2。自由基的进一步反应形成了一系列带有

氧化性、刺激性的二次污染物：O_3、过氧酰基硝酸酯（PAN）、醛类（如甲醛、丙烯醛）等光化学烟雾的主要成分。O_3 氧化能力远远低于 O 和 OH 自由基，见表 2－31。

表 2－31　O_3、O、OH 自由基与部分烃反应的速度常数　单位：ppm·min，（298K）

烃		O	OH	O_3
烯烃	乙烯	1190	7550	0.00296
	丙烯	6810	25000	0.016
烷烃	CH_4	0.0176	16.5	速度不大
	乙烷	1.37	443	
	丙烷	12.3	1800	
	正丁烷	32.4	5700	
	正戊烷	85.5	—	
	环己烷	177	12000	
芳香烃	苯	30.3	—	速度不大
	甲苯	107	—	
醛	甲醛	220	23500	
	乙醛	544	23500	

光化学反应产物为具有强烈氧化作用的氧化剂，臭氧占比例最大，超过 85%，其次是各种过氧酰基硝酸酯约占 10%，其他为甲醛、酮、丙烯醛等。近几年又发现有与 PAN 相近的过氧苯酰硝酸酯（PBN）。此外，如果大气中有 SO_2 存在，还含有硫酸雾微粒。

目前多数人认为将毒性效应及主要致毒产物的浓度结合起来作为衡量光化学烟雾严重程度，即以辐照一定时间产生 O_3 的量来作为光化学烟雾严重程度的标志。

车用汽油、煤油和柴油中含有烯烃和芳香烃（见表 2－32 和表 2－33）。汽油的辛烷值随链烯烃成分和芳香烃成分的含量增加而增大。在日本，作为防止光化学烟雾的措施，规定要控制汽油中芳香烃成分的含量，高级汽车和常规车用汽油的辛烷值分别不超过 98 和 91，链烯烃成分和芳香烃成分的含量分别为 0～20%（体积）和 30%～50%（体积）。

表 2－32　汽油组成　单位：%（体积比）

烃种类	高级汽油	常规车用汽油	精致石脑油	粗石脑油
链烷烃＋环烷烃	53	41	99.5	92.5
链烯烃	5.5	17.5	0.0	0.5
芳香烃	41.5	41.5	0.5	7.0

表 2－33　煤油和柴油组成　单位：%（体积比）

烃种类	饱和烃	链烯烃	芳香烃
煤油组成（C_{10}—C_{15}）	75～85	0.5～2	15～20
柴油组成（C_{10}—C_{20}）	70～80	0～2	20～30

根据光化学烟雾形成机制，使用化学抑制剂中止光化学反应。

6. 大气气溶胶

在环境科学中，把气溶胶看做是大气组成部分，定义为悬浮在大气中的固体或液体物质，或简称为微粒物质和颗粒物。在一些国家的环境标准中，常用下面一些名称：总悬浮颗粒物（Total Suspended Particulate，TSP），指直径小于100μm的粒子；落（降）尘，指直径大于10μm的粒子；飘尘，是指直径在0.1～10μm之间的较小粒子，是监测的一项重要指标，这种悬浮颗粒物能长时间悬浮在空气中，因此将其称为飘尘。小于0.1μm的气溶胶粒子，因不规则的布朗运动，容易凝聚生成大于0.1μm的粒子或接触地面而被吸收。＜5μm的飘尘，绝大部分能滞留在肺部。大气飘尘是空气污染物中数量大、成分及性质复杂、危害大的一种，其中不乏有毒有害物质，而且还可能是其他污染物的运载体，或其他污染物产生的催化剂、反应剂。粒径为0.1～3.5μm的微粒易进入呼吸道、支气管和肺部，并有80%的颗粒沉积在呼吸器官，习惯上称为可吸入颗粒物。通常飘尘占总悬浮颗粒物的60%～70%，可吸入颗粒物占30%～40%。

大气中的悬浮颗粒按其成因分为一次颗粒和二次颗粒，一次颗粒中又分为人为的和天然的。人为的一次颗粒约占全部一次颗粒的6.5%～10%；其中量最大的是煤烟及粉煤灰（全球年排放量为3630万t），其次是农业排放物（1000万t/a），钢铁工业排放物（900万t/a），非化石燃料（木材）及工厂废弃物（800万t/a），水泥厂粉尘（700万t/a），石油燃烧的排放物（200万t/a）。天然颗粒中最主要的是海浪蒸发产生的含盐（NaCl）气溶胶（其粒径一般在0.5μm以上，10亿t/a），其次为风扬起的土壤尘埃（粒径大于0.5μm，2亿t/a）和森林火灾引起的尘埃（2亿t/a）；此外每年还有约400万t火山灰排放到大气中。一次颗粒中对人类健康发生影响的还有植物的花粉。

二次颗粒为在大气中由其他污染物通过物理或化学作用生成的新的污染物，如由气相的硫化氢（H_2S）、二氧化硫（SO_2）、氮氧化物（NO_x）生成的固相的硫酸盐、硝酸盐颗粒。二次颗粒的粒径一般都较小，粒径小于2μm的占70%～80%。就北京这样的大城市而言，空气中的总悬浮颗粒物主要来自汽车的尾气排放，其次为燃煤，再其次是扬尘，个别地区施工造成的扬尘可能是空气中悬浮颗粒物的主要来源。

按照颗粒物质的粒径和来源，气溶胶还可分为细粒子（等效直径小于2μm，主要来自人为源）和粗粒子（等效直径大于2μm，主要来自天然源（风沙和尘土））。实验表明，粗粒子和细粒子的区别不仅是质量、体积和分布不同，而且在化学性质、来源、传输、去除途径也完全不同。从细粒子的长大动力学的计算表明，一般很难超过1μm，即细粒子向粗粒子的转化是难以实现的。

按粒径大小大气气溶胶还可分为：爱根核模，粒径小于0.05μm的颗粒，发生碰撞并长大进入积聚模；积聚模，粒径在0.05～2μm之间的颗粒，主要来源于核模碰并，燃烧过程产生的蒸汽冷凝凝聚以及各种气体通过化学反应转化成的二次粒子，烟雾和大部分的硫酸盐。积聚模不易被干、湿沉降除去，主要靠扩散除去；粗粒子模，粒径大于2μm的颗粒，可通过干、湿沉降除去。

大气气溶胶还有以下一些术语：轻雾或霭，指液态分散性气溶胶和液态凝集性气溶胶的统称，直径约为5～100μm，水平视程在1～2km之内；重雾，指直径为2～30μm的粒子，水平视程小于1km；尘，指固态分散性气溶胶，有一个宽的尺寸谱，一般直径大于1μm；烟，指固态凝聚性气溶胶，烟具有“胶体”特性。

气溶胶的化学组成复杂，含有70多种元素，按成分的百分含量排列，大致为：硫酸盐、

溶于苯的有机物、硝酸盐、铁、铵等。

粒径小于 2.5μm 的：SO_4^{2-}，C（炭黑），有机物，NH_4^+，H^+，Pb，As，Se，Zn，Cu，Ni，Mn，Sn，Cd，V，Sb，NO_3^-，Cl^-；

粒径大于 2.5μm 的：Fe，Ca，Ti，Mg，K，PO_4^{3-}，Si，Al，C（花粉、孢子），NO_3^-，Cl^-。

在对流层中，由于气溶胶粒子的散射作用减弱到达地面的太阳辐射，从而降低能见度，可危及行车安全，还可进而改变环境温度和影响植物的生长。在英国英格兰地区，儿童佝偻病曾经很普遍，原因是空气中的粉尘、烟雾过多，长年累月不散，使人体接受阳光很少，维生素 D 难以合成，导致骨骼缺钙。

气溶胶有大的比表面，为污染气体提供良好的反应场所，增强大气的化学反应。作为凝结核，直接参与大气中云、雾的形成，改变降水过程；能损害植物和腐蚀建筑物；对人体的危害取决于粒径和化学性质。粒径大于 10μm 的颗粒能沉积在鼻腔和咽喉，粒径大于 5μm 的颗粒几乎都滞留在上呼吸道，粒径小于 3μm 颗粒在下呼吸道沉积率高，而在下呼吸道沉积率最高的是 1μm 左右的颗粒。沉积还与呼吸频率有关，呼吸频率增加，沉积率降低。通常，沉积的粒子随着呼吸道壁上的纤毛的运动可与呼吸道分泌物一起被送到咽喉，以痰的形式咳出。在暴露于 CO、NO_x、SO_2 的条件下，纤毛的运动受到抑制。在没有纤毛的肺泡区沉积的粒子一部分可以被肺泡内的吞噬细胞所吸收，余下部分就会侵入到肺泡组织内部而导致尘肺等病变。

颗粒粒径＜10μm 的飘尘，成分复杂，除含有危害健康的二氧化硅外，还有铅、汞、铬、镍、镉、铁、铍等及其化合物等。飘尘具有吸湿性，在大气中容易形成凝聚核，核的表面又具有很强的吸附性，能吸附经高温升华而随烟气排放出来的各种重金属、各种有害气体和致癌性很强的多环烃类物质，如苯并［a］芘等。有的飘尘还有催化作用，像钢铁厂排放出来的 Fe_2O_3，能催化其表面吸附的 SO_2，使其氧化成 SO_3，SO_3 吸收水蒸气变成比 SO_2 毒性大 10 倍的硫酸雾。1952 年 12 月 5～9 日的伦敦烟雾事件发生时，检测出大气中飘尘比平时高 5 倍，SO_2 高 3.5 倍。伦敦市民呼吸了这种毒雾，到第 3～4 天开始发病，各年龄的死亡人数都在增加，尤其是老人和幼儿以及患心肺疾病的死亡人数更多，两周内就比上一年同期多死亡 4000 人，此后伦敦多次发生类似事件，受害总人数达万余人（见表 2－34）。从表 2－34 可见，烟尘和死亡人数有一定比例关系，而 SO_2 并不成比例关系，说明烟尘对人的健康直接相关。在日本大阪，1962 年 12 月，当检出飘尘的日平均浓度为 1.0mg/m³ 时，次日就会出现死亡率高峰，比前后两天的死亡率增加 20%，但当时检出的 SO_2 浓度未见显著增高，进而说明了飘尘在起主导作用。美国环境保护局（EPA）1987 年建议以可吸入粒子（IP，Inhaled Particles）来建立环境标准。国际标准化组织将 IP 定为 10μm，不少国家已将小于 10μm 的粒子定义为飘尘作为环境标准。环保监测部门和卫生部门把可吸入颗粒作为评价大气污染的重要指标。表 2－35 是 1999 年中国部分城市总悬浮颗粒物浓度年平均值。我国空气质量总悬浮颗粒物三级标准的年均值为 0.3mg/m³，从表 2－35 可看出，我国众多城市的总悬浮颗粒物浓度的年均值都高于这个标准值，说明我国城市的颗粒物污染严重。

大气中飘尘的自然消除，有干沉降和湿沉降两种。干沉降是飘尘与其他颗粒碰撞发生的沉降；湿沉降是降雨或降雪使飘尘沉降，但雨水对粒径为 0.1μm 及 0.1μm 以下的飘尘的沉降作用极微。

表 2－34　伦敦烟雾事件分析

年　份	烟尘，mg/m³	SO_2，mg/m³	死亡人数
1952	4.46	3.8	4000
1956	3.25	1.6	1000
1957	2.40	1.8	400
1962	2.80	4.1	750

表 2－35　1999 年中国部分南北方城市总悬浮颗粒物浓度年平均值　　单位：mg/m³

序　号	北方城市	浓　度	南方城市	浓　度
1	兰州	0.655	拉萨	0.320
2	大同	0.612	萍乡	0.273
3	吉林	0.563	株洲	0.270
4	呼和浩特	0.507	襄樊	0.269
5	汉中	0.494	武汉	0.259
6	西宁	0.489	宜宾	0.246
7	乌鲁木齐	0.463	成都	0.231
8	安阳	0.462	贵阳	0.221
9	焦作	0.462	三明	0.220
10	包头	0.443	宜昌	0.219

注：资料来源：2000 年中国社会统计资料。

大气中完全没有微粒的后果也是难以想象的。若大气纯净，水蒸气失去凝结核心，只能在大气中积聚，一旦瞬时降下，就是特大暴雨，地球上的生物就难以生存和发展。

7. 酸雨

酸雨是指雨水中含有一定数量酸性物质（硫酸、硝酸、盐酸等）的雨、雪、雹、雾等自然降水。关于“酸雨”的定义，有关词典定义为“酸雨是表示 pH 值低于与大气中二氧化碳相平衡的蒸馏水 pH 值（5.6）的降水”。

1872 年英国化学家首先提出了“酸雨”的概念，但作为全球性的酸雨则是在 20 世纪 50 年代初在欧洲发现并受到关注。20 世纪 60 年代初，酸雨中心在英格兰东南部、法国北部和波兰。20 世纪 60 年代中期，美国出现酸雨。1979 年 3 月我国首次在贵州松桃和湖南长沙、凤凰等地发现酸雨。同年 9 月，又在重庆、上海及附近监测到酸雨，吉林省于 1984 年 7 月监测到酸雨。1954 年欧洲创建了国际协作的降水监测网。1972 年瑞典政府向联合国人类环境会议提出了“穿越国界的大气污染：大气和降水中硫对环境的影响”报告，从此酸雨引起世界各国的普遍重视，并成为国际性环境问题。近 20 年，酸雨在全世界的分布范围日益扩大。酸雨和 CO_2 的温室效应、臭氧层的破坏已成为当今全球性的三大环境问题之一。

1960 年以前，世界各地降水的 pH 值一般大于 5，少数工业区曾降过酸雨。目前欧洲、北美及亚洲的日本和中国长江以南地区，降水的 pH 值经常在 5 以下，有些地区达 4。1982 年 12 月初美国洛杉矶经受了两天的酸雾污染，地面形成高浓度酸雾颗粒，pH 为 1.7。目前，我国降水的 pH 值低于 5.6 的区域已占国土面积的 40%，成为欧洲、北美之后的世界第三的重酸雨区。华中、华南、西南、华东酸雨严重，北方局部地区也出现酸雨。106 个城市

降水的 pH 值范围为 4.3～7.47，pH 值低于 5.6 的城市有 43 个，占统计城市的 40.6%。我国南方的怀化、景德镇、遵义、宜宾、赣州等城市的酸雨率超过 80%。表 2－36 是我国部分城市降水的 pH 值。

表 2－36　我国部分城市降水的 pH 值

城　市	pH	城　市	pH	城　市	pH
贵阳	4.07	杭州	4.72	北京	5.96
重庆	4.14	宜宾	4.87	天津	5.96
长沙	4.30	石家庄	5.36	济南	6.10
南京	4.59	武汉	5.47		

酸雨中存在的酸性物质有无机强酸（H_2SO_4、HNO_3、HCl）和少量有机酸（甲酸、乙酸等），但酸性物质主要是 H_2SO_4 和 HNO_3，其前驱物是 SO_2 和 NO_x，其来源主要包括天然源和人为排放源。联合国环境规划署（UNEP）的最新估算指出，天然硫排放量占全球硫排放总量的 50%。但局部地区，人为排放量占该地区总排放量的 90% 以上，而天然排放仅占 4%，其余 6% 来自其他地区。同全球性的地区性估算的 SO_x 排放量相比，很少有关于大气中 NO_x 天然源排放的研究。NO_x 由自由源排放与人为源排放的比率约在 1:1～5:1 之间。

全球范围释放到大气中的 SO_2 大部分是人为排放的，对特定的高密度工业区域而言，人为排放比率可能高达全部 SO_2 排放的 100%。化石燃料燃烧是大气中 SO_2 含量高的原因，约占人为排放量的 85%，矿石冶炼和石油精炼分别占 11% 和 4%。NO_x 的人为排放源集中在北半球各人口聚居区，美洲、欧洲交通运输的排放在很大程度取决于机动车的排放，如欧共体机动车的 NO_x 排放量约占人为总排放量的 50%，发电厂占 25%～33%。对于瑞典这样大量使用硝酸基化肥的国家，人为 NO 的排放，30%～40% 来源于农业生产。

我国降水中 SO_4^{2-}/NO_3^- 比值达 4，国外值为 2。说明我国酸雨主要是大气中的 SO_2 造成的。这与我国大气污染状况是一致的。表 2－37 的数据也说明了这一点。

表 2－37　湖南省长沙市 1991 年降水成分测报

化学成分	SO_4^{2-}	NO_3	NH_4^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Cl^-
含量，mg/L	10.44	2.18	1.30	1.87	0.05	0.372	0.628	0.50

高烟囱把 SO_2、NO_x 输送到几百甚至上千千米以外地区，这是产生广域酸雨的主要原因。但许多研究结果表明，降水的酸度和人为 SO_2 排放量分别与降水中 SO_4^{2-} 含量之间，不是经常线性相关的。这说明酸性降水的形成是一个很复杂的物理化学过程。酸雨的发生与天气形势和降水有关。重庆市耗煤量只及北京的三分之一，但每年排放 SO_2 为北京的二倍。重庆处于盆地中，其地形和气象条件不利于 SO_2 污染物的扩散，加上潮湿多雨，易形成酸雨，为我国的强酸雨降雨区。另外，降雨次数多，降雨历时长，大气中碱性物质也被冲刷得较干净。所以降水酸度增加，不一定就是由于酸性物质增多。

酸雨和大气层中干燥的酸性物质以及臭氧类污染物质，对气喘病、心脏和肝脏病患者以及儿童和老人的健康都形成了威胁，其症状是气喘、气短和咳嗽。

弱酸性的雨水能溶解地壳中的矿物质，有助于动植物对矿物质的吸收。但当酸雨的 pH 值降低到 5 以下时，酸性的雨水将会使植物中的钾、钙、钠、镁等无机物及糖类、氨基酸、

维生素等有机物淋失而造成植物幼苗叶子的伤害（其阈值为 pH＝3.0），使植物易受病虫害和其他环境因素的侵扰。1982 年 6 月 18 日酸雨后，重庆东南郊区 2 万亩水稻的叶片突然黄枯，受害最严重的是新品种（杂交水稻）。此外，酸雨导致土壤酸化，土壤酸化会抑制土壤中有机物的分解和对生物固氮作用的干扰，使土壤天然矿物结构遭到破坏，淋失土壤中的钙、镁、钾等营养元素而使土壤贫瘠化，溶解土壤中的某些金属离子 Al^{3+}、Zn^{2+}、Cu^{2+}、Cd^{2+} 等使之进入地下水和湖泊中，造成更广泛的污染和生态影响。

酸性的雨水会使鱼类及其他某些水生生物的生长和繁殖受到影响，使大量的湖泊变为“死水”（生物已灭绝）。由于酸雨作用而从土壤流失到水体中的某些金属离子（如铝）会危及鱼类的生存，其生物学机制是铝离子会刺激鱼鳃产生一种粘液，这种粘液对鱼鳃的纤维产生腐蚀作用，直到鱼窒息为止。一些两栖类动物对酸雨特别敏感，例如在一些暂时性水塘中繁殖的两栖类动物，当所栖息的水塘中水的 pH 值达到 4 时，其死亡率达 50%。加拿大 30 万个湖泊中，有 14000 个湖泊已成为“死水”，4 万个湖泊受到严重影响。虽然在一部分湖泊中撒石灰以进行中和，但只有短时期的效果。

酸雨对森林的潜在威胁极大。酸雨改变了森林土壤的营养成分和平衡，也干扰树木吸收营养的能力。在过去 20～50 年间，大面积森林土壤的酸度增加到原来的 5～10 倍。酸雨造成大片森林损失首先在德国发现，1982 年有 8% 森林受害，1986 年高达 54%，以后略有下降，1988 年为 52%。据估计，今后 70 年中，森林破坏将使德国每年损失 55 亿至 88 亿马克（约 29.8 亿至 47.7 亿美元）。

酸雨对各种材料有腐蚀作用。由于酸雨严重，重庆的户外金属建筑如路灯、电线等的使用期要比南京短 1～5 倍；1980 年新建的重庆长江大桥，其不锈钢底座已经锈蚀。酸雨还对世界各地的历史古迹、建筑物产生剥蚀。从希腊的阿克罗波斯到荷兰的阿姆斯特丹王宫，波兰的克拉科夫的中古建筑与纪念碑，都受到酸雨的腐蚀。雅典的古迹在过去 20～25 年被污染破坏的程度比此前 2400 年还严重。在波兰南部的卡托维兹地区，酸雨造成铁轨腐蚀迫使火车减速行使。在美国东部，损失了约 3.5 万个历史性建筑物和 1 万座纪念碑。在印度的著名古建筑泰姬—玛哈陵也因酸雨使原先光洁的大理石面失去光泽。

8. 恶臭

恶臭物质，是指一切刺激嗅觉器官引起人们不愉快及损坏生活环境的气体物质，恶臭和噪声一样同属感觉污染，直接作用于嗅觉方面而危害健康。恶臭物质如硫化氢（H_2S）、二硫化碳（CS_2）、已基硫氰化物（烂葱头，C_2H_5SCN）、芥末臭味的硫代异氰酸酯（C_2H_2NCS）、苯酚（C_6H_5OH）、甲醛（HCHO）、丙酮（$C_2H_6C=O$）。$=S$、$-SH$、$-SCN$ 等是形成恶臭的原子团，又名“发臭团”。

恶臭包括生活中产生的恶臭及工业生产中产生的恶臭两类。例如，在新迁入居室时会接触到涂料、粘接剂等含有挥发性有机化合物等有毒的恶臭。另外，居室、厨房、厕所，特别是垃圾堆都是恶臭经常发生的地方。工业生产中的恶臭发生源更是多种多样，如化工厂、香料厂、涂料厂、食品发酵厂、农药厂、家畜厂等，特点是臭气产生量大，有些臭气还有毒。恶臭种类很多，迄今单凭人的嗅觉能够嗅到的就有 4000 多种，对人危害较大的有几十种。表 2－38 是恶臭物质的分类及其臭味性质。

20 世纪 60 年代，在日本，对鱼骨场、皮革厂恶臭的投诉不断增加。1966 年，日本宫城公害防治条例最早规定以食盐水平衡法为基础的恶臭浓度标准。1971 年日本颁布恶臭防止法，将恶臭和大气污染、水质污染、土壤污染、噪声、震动、地面下沉一起被列为 7 项环境

“公害”，并制定了臭气浓度及22种单一恶臭物质的排放标准。美国的恶臭来源主要是垃圾焚烧、化工厂、咖啡焙烧等，1971年颁布了《清洁空气法》，同时各州也规定了相应的法规。德国在《联邦侵害防止法》及《有关空气质量的控制的技术指针》中，对恶臭污染作出了规定，但未给出具体标准及测定评价方法。

表 2-38　恶臭物质分类及其臭味性质

分类			主要恶臭物质	臭味性质
无机物	硫化物		硫化氢、二氧化硫、二硫化碳	腐蛋刺激臭
	氮化物		二氧化氮、氨、碳酸氢铵、硫化铵	尿味刺激臭
	卤素及其化合物		氯、氯化氢、溴化氢	刺激臭
	其他		臭氧、磷化氢	刺激臭
有机物	含碳氢化合物	烃类	丁烯、乙炔、丁二烯、苯乙烯、苯、甲苯、二甲基萘	刺激臭、电石臭、卫生球臭
	含硫化合物	硫醇类	甲基硫醇、乙基硫醇、丙基硫醇、丁基硫醇、戊基硫醇、己基硫醇、庚基硫醇、二异丙基硫醇、十二碳硫醇	烂洋葱臭、烂甘蓝臭
		硫醚类	二甲基硫醚、二乙基、二丙基、二丁基、二苯基硫醚	烂洋葱臭、大蒜臭
	含氮化合物	胺类	一甲基胺、二甲基胺、三甲基胺、二乙基胺、乙二胺、二甲基甲酰胺、二甲基乙酰胺	烂鱼、腐肉臭、尿汗臭、尿臭
		酰胺类	吲哚、β—甲基吲哚	粪臭
		吲哚类	吡啶、丙烯腈、硝基苯	芥籽气臭
		其他		
	含氧化合物	醇和酚	甲醇、乙醇、丁醇、苯酚、甲酚	刺激臭
		醛	甲醛、乙醛、丙烯醛	刺激臭
		酮和醚	丙酮、乙醚、二苯醚、丁酮、乙酮	汗臭、尿臭
		酸	甲酸、醋酸	刺激臭
		酯	丙烯酸乙酯、异丁烯酸甲酯	香水臭、刺激臭

注：摘自吴芳云等：环境保护和石油工业，石油工业出版社，1999年。

我国对恶臭污染的研究起步较晚，参考日本的经验，于1993年制定了恶臭污染物排放标准，包括臭气浓度及三甲胺、硫化氢、甲硫醇、甲硫醚、二甲二硫、二硫化碳、苯乙烯8种单一恶臭物质的厂界标准及排放标准；同时，对其测定方法也作出了具体规定。恶臭的评价要素一般包括恶臭的强度、广泛性、性质等几个方面。表2-39是几种恶臭物质在不同恶臭强度下的浓度。虽然从一开始恶臭就是限制对象，但采取的相应技术对策与其他环境污染问题相比非常迟缓。按分类，恶臭现象虽属于大气污染的一种形态，但由于恶臭物质种类繁多，又能以低浓度（ppb）产生嗅觉刺激，所以很难按大气污染同一类型进行处理。

恶臭污染防治相当困难，原因是一般有害气体对人体和动植物的影响程度大致与气体浓度和接触时间成正比，但恶臭污染物给人造成的不愉快感觉和危害（恶臭强度）却是与其对人嗅觉的刺激量（恶臭污染物浓度）的对数成正比。亦即将大气中恶臭物减少90%，恶臭

强度仅减少1/2。另外，恶臭污染的阈值很低，难以除去。若要将其降低到阈值以下，恶臭物的去除率要达到99.999%以上。防止恶臭污染的最终出路在于实行清洁生产，采用先进工艺推动技术进步，提高操作管理水平。在现阶段，对一些主要恶臭污染源和主要恶臭污染物进行有针对性的治理，仍然是减少污染物排放量，减轻恶臭污染物对环境影响的重要途径。

表2-39　几种恶臭物质在不同恶臭强度下的浓度

恶臭物质	不同强度的恶臭物质浓度，ppm		
	2.5级	3.0级	3.5级
氨	1.0	2.0	5.0
甲基硫醇	0.002	0.004	0.01
H_2S	0.02	0.06	0.2
二甲基硫	0.01	0.05	0.2
三甲基胺	0.005	0.02	0.07

四、大气污染物的散布

污染物进入大气后要经历一系列迁移转化过程，最终形成对环境的影响。污染物在大气中的迁移变化过程，主要包含气象学过程、空气动力学过程、化学过程等。这些过程的个别分析或整体的综合研究和应用，便构成了大气环境学的领域和各个分支。大气污染物的散布是大气污染物迁移转化的物理过程。

近年来，大量的大气污染物排放引起全球大气效应和其他生态效应的报道不在少数，然而除CO_2外未发现污染物质在大气中的积累，原因是绝大多数污染物最终要通过干沉积等迁移过程，使大气中污染物质暂时得以维持平衡。影响大气污染物迁移转化的因素是多方面的，有排放源的特点、污染物性质、地形地貌状况、气象因子、气象过程等。大气污染物的迁移主要有以下几种：

随气流的搬运而发生稀释，这种过程受风速、风向影响明显。另外。大气湍流也会使污染物扩散。大气湍流在大气层内随空间位置和时间的不规则涨落，伴随着流动的涨落，温度、湿度、大气中各种物质属性的浓度，如气态污染物的浓度、颗粒物的密度都呈现无规则的涨落。大气湍流是大气的基本运动形式之一，起伏的地形、白天强烈阳光的照射都会引起湍流。湍流扩散是空气污染物局部性散布的主要过程。

靠近地面的气层称为大气边界层，或称为低层大气。大气边界层的基本特征表现为气象要素有明显的日变化，其本质是在这一层大气中运动始终具备湍流特点。习惯上认为自地面至500～1000多m的气层是大气边界层。

由于动力或热力过程，大气边界层经常存在上下层湍流强度的不连续性，如果下层空气的湍流强，上部空气的湍流弱，中间存在一个湍流特征不连续的界面，下部的污染物容易混合扩散，但不容易穿过界面向上扩散。这个湍流特征不连续面以下的大气称为混合层，其高度叫混合层高度。极不稳定的边界层是一种典型的混合层。混合层给污染物扩散造成一定影响：使混合层里排放的污染物局限在地表面至混合层顶的空间输送扩散，叫做陷阱型扩散；原先在混合层以上的浓密烟流一旦被向上抬升的混合层截获将迅速带回地面而形成地面高浓度污染，叫做熏烟型扩散。

污染物通过重力沉降或湍流扩散作用传输至地球或其他环境物体系表面，叫做干沉积，颗粒物和气态污染物都会有干沉积，相反的过程叫吹扬或再悬浮。

污染物被云、雨水或冰晶吸收、溶解，随降水物降至地面的过程叫做湿沉积，即降水冲刷，如果是讨论污染物向地面的输送就叫湿沉积。

总之，污染物的散布过程往往复杂，并相互作用、相互制约。污染物在环境中的迁移、转化受其所在环境条件的影响和制约：在不同环境条件下，相同的污染物发生不同的化学结构变化和形态变化；在一定的环境条件下，污染物与环境介质相互作用，会产生新的污染物。由于污染源排放的污染物种类、形态、数量、方式、环境条件是多变的，故污染物在环境过程中的迁移、转化过程也必然是多变的，对人类和环境的影响也是综合的、立体的。图 2-4 是大气污染对人体及环境影响的途径示意图。

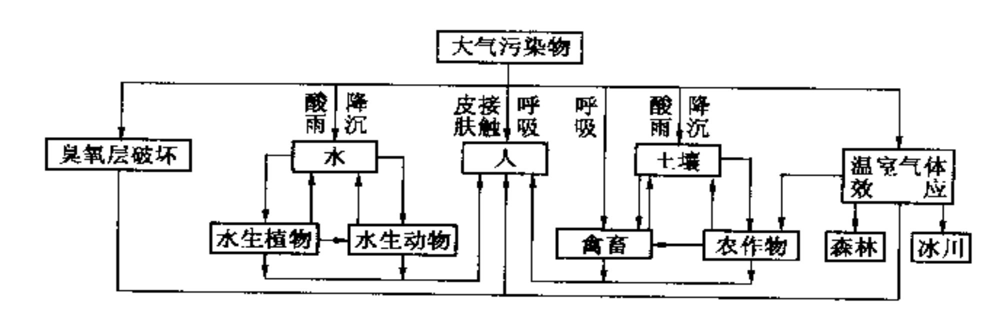


图 2-4　大气污染对人体及环境影响的途径

（资料来源：杨永杰等：化工环境保护概论，化学工业出版社，2001 年）

围绕大气扩散研究建立了许多模型。早期的大气扩散模式应用大部分局限在单源头，主要是为烟囱设计，为核设施的安全和生物化学武器效应分析提供基础。20 世纪 60 年代起随着多源扩散模式的出现并应用推广至城市或工业区硫氧化物和粒子物污染模拟，扩散模式逐步成为气质管理的重要基础和工具。随着酸雨的危害和平流层臭氧变化等长远性问题的提出，模式的开发和应用也从小区域扩大到国家，各大洲以至全球尺度，由简单的只包含物理输送扩散拓宽到沉积损耗和化学转化的模拟。现在扩散模型主要用于气质趋势、现状分析、影响评价、烟囱高度的计算、大气污染控制对策、措施的效果评定和优化分析、大气污染物排放标准的制定、大气监测站网的设计等。

五、大气污染分级标准及我国大气污染状况

1. 大气污染评价的分级标准

我国目前评价空气质量的方法是根据若干种污染物在空气中的含量将空气质量分成若干等级。在评价空气质量时最常选用的指标是：总悬浮颗粒物（TSP），二氧化硫（SO_2），氮氧化物（NO_x），臭氧（O_3）。其他指标还有：氟化物（F^-），一氧化碳（CO），二氧化碳（CO_2），硫化氢（H_2S），总烃（TCH）等。通常，按总悬浮颗粒物（或可吸人颗粒物）、二氧化硫、臭氧、氮氧化物的浓度计算出其相应的污染指数（API）并根据污染指数规定污染的级别。我国现行空气质量标准见表 2-40。

2. 我国大气污染状况

据国家环保局对我国包括各省省会（或自治区首府）、沿海开放城市在内的 47 个重点城市的空气污染监测结果的统计分析，认为没有一个城市的空气质量达到国家一级标准，66%

以上的城市甚至达不到二级标准。在全国实行环境监测的338个城市中，只有112个（占33%）达到二级标准，138个城市（占41%）甚至超过三级标准，属严重污染。1999年，全国二氧化硫排放量为1857万t，烟尘排放量1159万t，工业粉尘排放量1175万t，空气污染物排放量是相当大的。造成我国空气污染的主要原因是：能源结构中煤炭的比例过大，煤炭的利用方式落后；汽车数量增加快，因而尾气排放增加；部分工业区工业废气大量超标排放。表2－41是1999年中国部分南北方城市的空气污染综合指数。

表2－40 空气污染指数范围及相应的空气质量级别

污染指数（API）	质量级别	质量状况	表征颜色	对健康影响	建议采取的措施
0～50	Ⅰ	优	浅蓝		可正常活动
51～100	Ⅱ	良	海绿		可正常活动
101～151	Ⅲ1	轻微污染	浅黄	易感人群症状有轻度加剧，健康人群出现刺激症状	心脏病和呼吸系统疾病患者应减少体力消耗和户外活动
151～200	Ⅲ2	轻度污染	浅黄	易感人群症状有轻度加剧，健康人群出现刺激症状	心脏病和呼吸系统疾病患者应减少体力消耗和户外活动
201～250	Ⅳ1	中度污染	红色	心脏病和肺病患者症状显著加剧，运动耐受力降低，健康人群中普遍出现症状	老年人和心脏病、肺病患者应停留在室内，并减少体力活动
251～300	Ⅳ2	中度重污染	红色	心脏病和肺病患者症状显著加剧，运动耐受力降低，健康人群中普遍出现症状	老年人和心脏病、肺病患者应停留在室内，并减少体力活动
301～500	Ⅴ	重污染	褐色	健康人运动耐受力降低，有明显强烈症状，提前出现某些疾病	老年人和病人应当留在室内，避免体力消耗，一般人群应尽量减少户外活动

表2－41 1999年中国部分南北方城市空气污染综合指数统计 单位：%

序号	北方城市	浓度	南方城市	浓度
1	太原	8.633	重庆	5.093
2	乌鲁木齐	6.588	宜宾	5.083
3	大同	6.477	贵阳	4.735
4	北京	5.953	株洲	4.593
5	兰州	5.595	广州	4.070
6	吉林	5.592	长沙	3.988
7	石家庄	5.490	武汉	3.705
8	鞍山	5.208	上海	3.573
9	运城	4.680	自贡	3.460
10	包头	4.625	杭州	3.182

注：资料来源：2000年中国社会统计资料。

六、大气污染的防治措施

大气污染物分颗粒污染物和气态污染物两种，因而应有不同的污染防治措施。

1. 颗粒污染物（尘污染）的防治措施

按作用机理来分，常用的颗粒物污染防治方法有机械法、湿法、过滤法、静电法四种。

机械法是采用机械力（如重力、离心力等）将气体中所含尘粒沉降分离的一种方法。常用的设备有惯性除尘器、旋风除尘器、组合式多管旋风除尘器和重力沉降室等。机械除尘对粒径较大的颗粒物除去效果较好。

湿法除尘是通过废气与液体充分接触，利用液体湿润捕集废气中的尘和雾滴的一种除尘方法。常用的设备有旋风水膜洗涤器、自激喷雾洗涤器、泡沫除尘器、文丘里洗涤器等。湿法除尘最适宜于含有易燃易爆颗粒物或气体的除尘。

过滤法除尘是利用过滤介质将含尘气体中的尘粒捕截分离的一种除尘方法。过滤式除尘效率高且稳定，运行可靠，获得了广泛的应用。常用的装置有袋式除尘器、颗粒除尘器等。一般袋式除尘器不适宜于高温烟气除尘，颗粒除尘器可用于净化高温、易腐蚀、易燃易爆的含尘气体，但不适宜于过滤粘性大的粉尘。

静电法除尘是利用粒子的荷电性，使含尘气体通过高电场，利用电场力实现粒子（固体或液体）与气体分离的一种除尘方法。常用的装置有干式电降尘器和湿式电除尘器。静电除尘几乎可以捕获一切固态或液态粒子，而且具有高效率、低阻力特点，处理气体量大，适用温度范围广，被广泛地应用于各种工业部门中，特别是火电厂、冶金、化工、建材及造纸等部门。该方法的主要缺点是造价高。

实际工作中往往同时采用多种方法联合除尘，究竟采用什么除尘装置要根据颗粒物性质、运行环境及经济分析等方面综合考虑。

2. 气态污染物的防治措施

气态污染物的净化主要是根据物理的、化学的及物理化学的原理进行。目前常用的气态污染物防治措施主要有七种：吸收法、吸附法、冷凝法、催化转化法、燃烧法、生物净化法及膜分离法。

吸收法是利用废气中不同组分在液体中溶解度的不同来分离和净化分子状态污染物的净化方法。吸收法又分为物理吸收和化学吸收。物理吸收是使被吸收的气体溶于液体，不发生化学反应，如用水吸收醇类和酮类、用汽油吸收烃类等。化学吸收是使被吸收的气体与液体发生化学反应，如用碱液吸收 SO_2、用水吸收 NO_x。常用吸收设备有板式塔、喷洒塔、文丘里塔及表面吸收器等。吸收法净化效率高，应用范围广，是净化气态污染物的常用方法。

吸附法是利用多孔固体吸附剂对废气中不同成分吸收能力的不同，将某些污染物从气体吸附到其表面，从而达到分离、净化的目的。吸附是将气体分子“浓缩”到固体吸附剂表面。吸附法应用范围很广，可分离回收绝大多数有机气体和大多数无机气体，净化效率较高，是处理气态污染物的重要方法之一。常用的吸附剂有活性炭、焦炭、骨碳、沸石、硅胶、矾土、分子筛等，常用的吸附装置可分为固定床、移动床、流化床三类。

冷凝法是根据污染物在不同温度下具有不同饱和蒸汽压，通过降温或加压使处于蒸汽状态的污染物冷凝，从而达到净化的目的。冷凝法净化效率较低，单纯冷凝往往达不到净化要求，该方法常用于吸附、燃烧等流程的预处理。但由于冷凝回收的物质很纯，因此冷凝法多用于回收高浓度有机蒸汽，或用于预先回收某些可利用的纯物质。

催化转化法是利用催化剂的催化作用，使废气在催化床发生催化反应，使之转化成无害

或比原状态更易于处理和回收利用的气体净化方法。催化转化法可分为催化氧化法和催化还原法两类。催化氧化使气态污染物氧化为无害的或更易去除的其他物质。催化还原将气态污染物还原为无害物质。催化转化法直接将有害物质转化成无害物质，避免了二次污染，设备结构简单，成本低，适宜于任何浓度的废气净化，是控制大气污染的一种重要方法。

燃烧法是利用废气中某些污染物质可以氧化燃烧，将其转变为无害或易除去物质的方法。该方法仅能处理可燃或在高温下可分解的气态污染物，其特点是净化度高、工艺简单、操作方便，可以处理浓度很低的废气，还可消烟、除臭，可用于石油化工、有机涂料、垃圾处理等有机气体或恶臭物质净化，但一般不能对污染物回收利用，也不能处理高湿或易爆气体。燃烧法分为直接燃烧法、焚烧法和催化燃烧法三类。

生物净化法是利用微生物的活动把废气中的有害物转化为低害甚至无害物。根据微生物作用机理的不同，可分为生物吸收法和生物过滤法。吸收法先将气态污染物用吸收剂吸收，使其从气相转为液相，然后再对吸收液进行生物化学处理。过滤法利用附着在固体滤质表面的微生物来处理污染物。生物法适用范围广、设备简单、处理成本低，尤其适用有机废气的净化。其不足之处在于不能回收物质，不适于高浓度废气处理。

膜分离法是在一定的压力梯度作用下，利用不同结构的薄膜对不同气体有不同透过率，从而分离气态污染物的一种方法。膜分离法的核心是选择合适的膜，用于气体分离的膜应能耐高温、高压，具有较高的气体渗透量，较强的选择性，抗干扰能力强，在各种杂质影响下能保持其性能。常用的膜分离设备有中空纤维气体分离器和平板型膜气体分离器两种。膜分离法净化效率高，随着高分子材料技术的发展，膜分离法显示出良好的发展前景。

3. 大气污染的综合防治措施

大气污染综合防治是一项复杂的系统工程，涉及面广，从我国目前的国情出发，大气污染综合防治可从以下几个方面着手。

全面规划、合理布局。充分利用大气自净能力、实现各功能区合理布局、协调区域经济发展和生态环境的关系，制定区域大气环境规划，提出综合防治措施。由于历史的原因，我国很多地区特别是大中城市布局不合理，工商混杂、工居连片现象比较普遍，全面规划、合理布局对改善这些地区的大气环境质量效益明显。

改善能源结构。我国能源结构以煤炭为主，煤烟型污染是我国很多地区大气污染的特征。因此，改变能源结构，大力发展煤气、石油液化气、水电、风能、太阳能等，将取得显著的环境效益。虽然在短期内从根本上改变能源结构是不现实的，但必须明确能源发展方向，目前应大力推广型煤及洗选煤，各地推广型煤的经验表明，型煤比散煤热效率高，可减少排放CO 70% ~80%、SO_2 40%、尘90%，节煤20% ~30%，还能减轻烟的黑度及其他有害物质。

提高能源利用效率。我国目前的能源平均利用率不到50%，提高能源利用率不仅节省能源，而且降低了大气环境污染。发展热电联供，实行集中供热，以高效、低能耗的大锅炉代替低效高能耗、污染严重的小锅炉，不仅可节能，还可缓解供电不足的矛盾。

清洁生产。清洁生产的思想是大气污染防治的根本途径，其要求是以清洁生产工艺和设备代替落后的工艺和设备；选择无污染或少污染的原材料和能源，替代污染严重的原材料和能源，以便从污染源头解决大气环境污染问题。

扩大绿化面积，增强植物净化功能。绿化不仅能美化环境、调节气候，对大气环境也能起到明显的改善作用。植物还具有良好的吸尘、滞尘作用。许多国家在制定大城市园林绿地

定额时提出人均30～40m^2，发达国家大城市实际人均绿化面积多在20m^2以上。我国城市绿化水平较低，许多城市人均公共绿地面积只有2～3m^2。因此，我国城市绿化的环境潜力较大。城市绿化的重点主要是卫生防护带绿化、道路绿化、工业区防污绿化及居民小区绿化。

大力发展公共交通，适度发展个人私车。我国是一个人口大国，我国的城市人口密度也大。城市中汽车排出的尾气已给我国的部分大城市造成很大污染，部分城市的污染类型已由煤烟型转变为煤烟型及光化学烟雾混合型。如果不计国情大力发展私车，汽车尾气造成的大气污染势必加剧，大量的私车还会带来交通负荷过重等不良后果。

行政监督、依法监督是防止大气污染的基本措施之一。目前我国已制定了一整套环境保护法律、法规，若严格按法律、法规办事，其环境、经济、社会效益将是非常明显的。对有些地区的重点污染源进行重点防治将会对区域大气环境质量起到明显改善作用。

七、全球大气环境监测系统（GEMS/Air）

1975年联合国环境规划署开始建立全球环境监测系统（GEMS），开始了为保护人类与自然资源的全球监测活动，联合国环境规划署的GEMS之下有30多个国际性监测项目，其中之一是以世界卫生组织（WHO）为中心的与推进人类健康有关的监测项目，目的是评价国际性城市大气污染的状况及动态，并获取大气污染与人体健康有关的基础数据。目前世界上有50多个发展程度不同的国家参加了该项目。

GEMS/Air是1973年作为WHO大气污染监测项目启动的。WHO针对以伦敦光化学烟雾（1952年12月）为代表的严重大气污染，1965年由几个国家合作收集大气污染与健康间关系的资料，进而在世界各地实施监测和进行数据分析，从而使GEMS/Air开始运转。20世纪70年代后期，监测网络得到迅速扩展。GEMS/Air是针对人口集中城市的国际性大气污染监测项目，GEMS/Air也将在维护健康确定必要的大气污染监测系统，促进国际间的情报交流和了解污染现状，提高对环境污染问题重要性的认识及搞好公共卫生等方面起着推动作用。特别是在以经济发展为首要任务的发展中国家，通过提高对大气污染问题重要性的认识和技术援助等，稳定开展监测项目，是GEMS/Air的目的。

目前，50多个参加国中有35个国家的主要城市按照规定在工业、商业和住宅区各选一个点进行SO_2和飘尘监测。另外，通过项目参加国的环境白皮书和学术论文等汇总了与NO_x、CO、Pb等有关信息，同时还收集了有关污染源和污染防治对策方面的资料。为了促进切实可行的大气污染监测系统的确立，出版了监测计划法、污染物质测定法、数据解析法等手册，对于发展中国家还通过派遣专家和提供监测设备等方式进行支援。

第四节　水资源与水体污染问题

一、天然水概况

天然水是海洋、江河、湖泊、沼泽、冰雪等地表水和地下水的总和。地球上水的总量约13.8亿km^3，其中97.5%为咸水，淡水仅占2.5%。在全部淡水中，77.2%在极地的冰川、冰盖中，地下水及土壤水占22.4%，湖泊和沼泽中的水占0.35%，大气中的水占0.04%，河流中的水仅占0.01%。淡水资源中可利用的仅是河流、湖泊及地下水中的一部分，仅占地球上全部淡水资源量的1%。表2－42是地球上各种水资源的储量及其所占比例。

表 2-42 地球上各种水资源的储量及其所占比例

水体类型	水储量		咸水		淡水	
	$10^{12}m^3$	%	$10^{12}m^3$	%	$10^{12}m^3$	%
海洋水	1338000	96.538	1338000	99.041		
冰川与永久积雪	24064.1	1.7362			24064.1	68.6973
地下水	23400	1.6883	12870	0.9527	10530	30.0606
永冻层中冰	300	0.0216			300	0.8564
湖泊水	176.4	0.0127	85.4	0.0063	91	0.2598
土壤水	16.5	0.0012			16.5	0.0471
大气水	12.9	0.0009			12.9	0.0368
沼泽水	11.47	0.0008			11.47	0.0327
河流水	2.12	0.0002			2.12	0.0061
生物水	1.12	0.0001			1.12	0.0032
总计	1385984.61	100	1350955.4	100	35029.21	100

地球表面的水（主要是海洋中的水）在太阳辐射下蒸发为大气层中的水蒸气，并随气流迁移到各地，遇冷凝结以降水的形式落入地表，再经河道或地下流入海洋。这就是自然界中水的循环，其动力是太阳辐射和地球重力。海洋水的停留时间比江河水长得多，估计每年返回海洋的江河水为 3.7×10^{16}kg，显著大于江河水储量。所以，一年中江河水的全部将多次返回海洋。表 2-43 是各种天然水的停留时间。

表 2-43 各种天然水的停留时间

天然水类型	水的停留时间，年
海洋	37600
冰	15000
地下水	—
湖泊	6.2
大气	0.028
江河	0.0337（≈12d）

天然水中的物质分为两类：一类为以溶解态存在的溶存物质，包括盐类、有机化合物与气体；另一类为气泡、矿物与有机固体等，呈胶体或颗粒状态，水生生物习惯上也列入此类。

1．海水的化学成分

海水中的化学元素和成分可分为常量元素、营养元素、微量元素、溶存气体和有机物等五类。

常量元素的浓度大于 1×10^{-3}mol/L，以钠和氯的含量最高。海水中氯化钠浓度约0.5mol/L，接近海水总含盐量。

营养元素是指与海洋生物生长有关的元素，包括浓度在 1×10^{-3}mol/L 至 1×10^{-6}mol/L 之间的氮、磷、硅等非金属元素，以及某些微量金属元素（锰、铁、铜等）。

微量元素的浓度小于 1×10^{-6}mol/L，即浓度为 ppb 级（10^{-9}）或 ppt 级（10^{-12}）的元素。虽然微量元素浓度很低，但由于海水总量大，其总量仍相当可观。如海水中铀浓度为 3.2ppb，总量高达 40 多亿 t，比陆地铀资源总量高 1 个数量级。

海水中溶存气体除来自大气外，还来自海底火山爆发、海洋生物活动、化学反应等。如通过微生物活动，在无溶解氧的海水（还原环境）中往往出现气体硫化氢，在停滞不动的海水中还可能有甲烷和二氧化碳。海水主要溶存气体的含量范围如表 2－44。

表 2－44　海水主要溶存气体的含量范围

气　　体	O_2	N_2	CO_2	H_2S	Ar
含量范围，mg/L	0～8.5	8.4～14.5	34～56	0～22	0.2～0.4

海水中的有机物包括碳水化合物、脂肪、蛋白质、维生素、金属元素的有机化合物等。除少数由河流输入外，大部分是海洋生物分泌、排泄以及生物体裂解的产物。海水有机物含量见表 2－45。从表 2－45 可见，海水中有机物含量虽然较低。但对海水中无机成分的化学行为、海水的物理性质（水色、透明度等）都有较大影响。

表 2－45　海水有机质的含量

成　　分	总碳水化合物	总游离醣	总脂肪酸	结合氨基酸	总游离氨基酸	维生素 M	维生素 B_1	维生素 B_{12}	尿素
平均含量 ppb	200	10	5	50	10	1×10^{-3}	5×10^{-3}	5×10^{-4}	5

综上所述，海水是以含氯化钠为主（0.5mol/L）含一定量的硫酸镁（0.05mol/L）和多种少量或微量无机及有机物的系统。

2．陆地水体的化学成分

陆地水中以江河水和湖泊水最重要。陆地淡水总含盐量在 500mg/L 以下，比海水低得多。陆地水中各种离子的含量顺序为：$HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$，$Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+}$，而海水中相应的顺序为 $Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^-$，$Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$。少数元素在河水中的浓度高于海水（见表 2－46），多数低于或接近于海水。海水中有机碳浓度都低于 2mg/L，而在淡水中都高于此值，在有机物富集的河水中，有机碳浓度甚至高于 20mg/L。

表 2－46　河水中含量（R①）高于海水的元素

$10>R>1$	Ag　Cr　Ga　Hg　Mn　Ra　Si　Sn　Ti　Zn
$100>R>10$	Be　Co　Cu　Eu　La　Lu　Nd　Se　Tb　Th　Yb　Zr
$1000>R>100$	Al　Ce　Fe　Pb　Sm

①R 表示浓度，单位 mg/L。

由于自然条件和人类活动的影响，陆地水化学成分含量的时空差异明显大于海水。如热带高湿度地区河水之中的铝、铁、硅和有机物明显高于温带地区的河水；而干燥地区河水往往含有较多的钠、氯和硫酸根离子。

3．地下水、重水

地下水包括地下热水和地下冷水（统称地下水），地下冷水的化学成分复杂，表 2－47

是地下冷水常见成分。地下热水的储量远大于地下冷水。地下热水按温度分为三种：温度低于100℃以下的热水，高于100℃的过热水，高于375℃的超临界过热水。据分析，地下热水含有70种以上的元素，其中包括许多贵重的稀有元素及放射性元素，如I、Li、Sr、Rb、Cs、Ra等。

重水是由H^2（氘D）、H^3（氚T）及O^{17}、O^{18}所组成的水。重水在自然界中含量少而且分布不均：普通水H_2O^{16}占99.7%，重水H_2O^{18}占0.2%，$HO^{16}D$占0.04%，H_2O^{17}占0.03%，在大洋、盐湖、地下水、冰川以及湖沼深处，重水含量较大。

表2-47　地下冷水常见成分

阳离子	Na^+　K^+　NH_4^+　Mg^{2+}　Ca^{2+}　Fe^{2+}
阴离子	Cl^-　SO_4^{2-}　NO_2　NO_3^-　HCO_3　CO_3^{2-}　SiO_3^2　PO_4^3
未离解化合物	Fe_2O_3　Al_2O_3　H_2SiO_3
气体	N_2　O_2　CO_2　CH_4　H_2S　Rn
微量元素	Br　I　Li　F　B

二、水体污染来源、分类和特征值

1．水体污染和污染来源

水体是河流、湖泊、沼泽、水库、地下水、海洋的总称，其中也包括水中悬浮物、溶解物、水生生物、底泥等，是完整的生态系统。水体可分为陆地水体（地表和地下水体）、海洋水体。水体污染是指由于人类活动或自然过程导致污染物和能量进入水体，引起水质变化，从而影响水的生态作用的过程。

向水体排放污染物和释放能量的源都属污染源，污染源又分为自然污染源和人为污染源。人为污染源对水体污染最明显。目前，已知能引起水体污染的物质达160种以上。

人为的污染来自工业废水和生活污水，也有来自农药、化肥及未经处理的农灌污水，近年来部分地区的酸雨也成为新的水体污染源。

不同工业所产生的工业废水中所含污染物的成分有很大差异。表2-48是主要工矿业排入水体中的有毒污染物。

表2-48　主要工矿业排入水体中的有毒污染物

钢铁工业	酚、氰化物
造纸工业	漂白剂、含碱造纸黑液、酸、BOD物质、固体悬浮物
化学工业	漂白剂、各种酸、碱、盐类、汞、砷、镉、酚、氰化物、苯类、醛类、醇类、多环芳烃化合物、BOD物质
食品工业	酸、碱、氰化物、铬等
动力工业	冷却水造成的热污染，氰、酚、放射性核素
矿业	各类重金属，酸性水，固体悬浮物

冶金工业（包括黑色工业、有色冶金工业）所产生的废水主要有冷却水、洗涤水和冲洗水。电力工业中，电厂冷却水就是重要的热污染源。冷却水（分直接冷却水和循环冷却水）中的直接冷却水与产品接触，其中含有油、铁的氧化物、悬浮物等；洗涤水为除尘和净化煤气、烟气用水，其中含有酚、氰、硫化氰酸盐、硫化物、钾盐、焦油悬浮物、氧化铁、石

灰、氟化物、硫酸等；冲洗水中含有酸、碱、油脂、悬浮物和锌、锡、铬等。其中，含氰、含酚废水危害最大。

化学工业废水的成分复杂，含有多种有害、有毒甚至剧毒物质，如氰、酚、砷、汞。虽然有的物质可以降解，但通过食物链在生物体内富集，仍可造成危害，如多氯联苯等。化工废水中有含强酸，有的含强碱，pH值不稳定，对水体的生态环境、建筑设施和农作物都有危害。一些废水中含氮、含磷均很高，容易造成水体富营养化。

工业污染源向水体排放的废水具有量大、面广、成分复杂、毒性大、不易净化、处理难等特点，是需要重点治理的污染源。

农业污染源包括农业牲畜粪便、污水、污物、农药、化肥、用于灌溉的城市污水、工业污水等。由于农田施用化学农药和化肥，灌溉后经雨水将农药和化肥带入水体造成农药污染或富营养化，使灌溉区、河流、水库、地下水出现污染。此外，由于地质溶解作用以及降水淋洗也会使诸多污染物进入水体。

农业污染源的特点是面广、分散、难于收集、难于治理，含有机质、植物营养素及病原微生物较高。

生活污染源主要指居民聚集地区和商业区产生的生活污水。主要是洗涤水、冲刷所产生的污水。所含主要污染物为无机物和少量重金属离子，如 Cl^-，SO_4^{2-}，PO_4^{3-}，HCO_3^-，Na^+，K^+，Ca^{2+}，Mg^{2+}；耗氧有机物有纤维素、淀粉、糖类、蛋白质、尿素及洗涤剂。生活污水，尤其是医院污水、垃圾污水中常有各种病原菌（大肠杆菌及痢疾、伤寒、霍乱菌等）、病毒（肠道病毒、肝炎病毒等）及寄生虫（蛔虫、血吸虫、肝吸虫等）。

2000年，全国污水排放量401亿t，其中，工业污水197亿t，占49%；生活污水204亿t，占51%，生活污水排放量首次超过工业污水。排放的污水中，化学需氧量（COD）污染物，工业排放692万t，生活污水排放697万t。我国工业污水处理率已达87%。表2－49是我国沿海地区工业废水处理状况。而我国城市的绝大部分污水直接排入水体（1990年全国城市污水排放179亿 m^3，1999年为351亿 m^3），生活污水处理率不到30%，致使82%的水域和93%的城市地下水源被污染，水源水质明显恶化。据调查，全国430个城市有90%以上的饮用水源受到不同程度的污染，经济损失达377亿元。我国水体水质总体上呈恶化趋势。全世界每年约有超过4200亿 m^3 的污水排入江河湖海，污染5500亿 m^3 的淡水，约占全球径流量14%以上，水体的污染加剧了淡水资源的短缺，而水是人类和生物圈的生命“血液”。21世纪，水、粮和能源这三种资源中，最重要的是水。图2－5是全球三类国家争水对照图。

表2－49　我国沿海地区工业废水处理达标率　　单位：%

地　区	1987年	1988年	1989年	1990年	1991年	1992年	1996年
天津	35	44	53	53	56	58	12
河北	50	50	62	60	62	61	15
辽宁	52	56	56	58	59	65	23
上海	70	69	70	72	65	66	30
江苏	50	50	55	58	61	66	33
浙江	56	56	63	60	62	67	41
福建	23	25	30	32	31	38	33
山东	48	50	50	47	49	50	12

续表

地　区	1987 年	1988 年	1989 年	1990 年	1991 年	1992 年	1996 年
广东	48	50	50	47	49	50	30
广西	37	36	42	49	54	49	22
海南	—	17	17	23	37	37	49

注：摘引自刘海洋等：中国近海污染现状分析及对策．环境保护科学，2001 年，27（4），6~8。

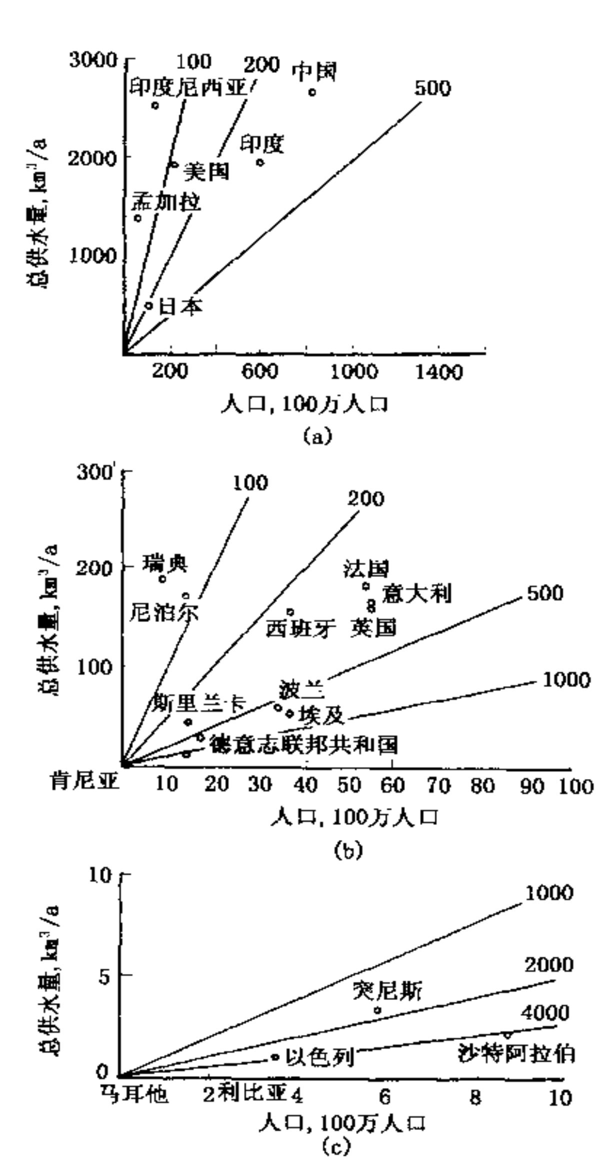


图 2-5　全球三类国家争水对照图

（a）大的国家；（b）中等国家；（c）小的国家；

线末端的数字表示每年 $100\times10^4m^3$ 水的争水人数；

（资料来源：陆渝蓉：地球水环境学，

南京大学出版社，1999，244 页）

2．污染物质的分类

水体污染物分为无毒污染物和有毒污染物。无毒污染物主要是醣类、木质素、纤维素、维生素、脂肪、类脂、蛋白质等天然有机化合物。另外，砂粒、土壤颗粒、矿渣等进入水体能形成飘浮状（在水面）、悬浮状及沉降到水底的污染物，一般对人体和生物无害。大部分无毒有机污染物在水中经过生物作用，可氧化分解成二氧化碳、水以及氮、磷等营养盐，并消耗水中溶解氧。如果有少量天然有机物排入水中，水体中溶解氧浓度变化不大，并可补充氮、磷等有利于生物生长的营养盐。但若排入过量，则消耗大量溶解氧，同时，生成的过量氮、磷营养盐会促使水藻等植物的急剧繁殖，死后残体分解又消耗大量溶解氧，结果使生物呼吸困难，造成鱼类和其他水生生物大量死亡，水质因而脏臭、色深。严重时，湖泊可被某些繁生植物及其残骸淤塞，成为沼泽，甚至干涸。在局部海区可能出现无生物的“死亡之海”，或者出现只有几种繁殖密集的藻类，使海水呈现粉红色或红褐色的“赤潮”。这就是水体富营养污染或水体富营养化。本身无毒、但通过生物活动耗乏水中的溶解氧，可能引起水体富营养化的物质，称为无毒污染物。无毒污染物质除了天然有机化合物以外，还有洗涤剂和化肥中残留的氮、磷等。

进入生物体累积到一定数量后，能使体液和组织发生生理功能的变化，引起暂时或持久的病理状态，甚至危及生命的污染物质是有毒污染物，如重金属、农药等。由于污染物的毒性与其被生物体摄入的数量有关，所以，对于水质的危害，存在一个临界值。该值可大致反映水质标准。另外，水中各种物质有其天然浓

度（背景值）。因此，讨论有毒污染物对水质影响时，须将其浓度、背景值和水质标准进行比较。同一污染物的毒害也与其存在形态有关。

3. 水体污染的特征值

颜色。纯净水是无色透明的，天然水经常呈现一定的颜色。它主要来源于植物的叶、皮、根、腐殖质、可溶性无机矿物质和泥沙等。纺织、印染、鞣革、造纸、化工、矿业等工业废水排入水体后，水色变得极为复杂。水的颜色越深说明有机污染物等含量越高。我国规定饮用水不超过 15°，地表水在 10°～20°。

浊度。浊度主要是由胶体或细小的悬浮物所引起，不仅沉积速度慢而且很难沉积。由生活污水中的铁和锰的氢氧化物引起的浊度十分有害。浊度对鱼类不一定有直接危害，但是由于浊度可减少太阳光的辐射强度，致使生物在河流中的生活能力降低。

温度。天然地表水的温度，随季节在 0～35℃范围内变化。由于排放的废水使得水体温度上升达到 40℃以上，即可造成热污染。

悬浮物。悬浮物是由各种废水排入水体而引起的。悬浮物能影响鱼类的生长，如限制鱼类的正常运动、回游以及得不到充足的食物等。悬浮物能截断光线，降低水体中藻类的光合作用，减缓水底活性，导致河底部动植物窒息，使水体同化能力降低。悬浮物通过过滤法测定，滤后滤膜或滤纸上截留下来的物质即为悬浮固体。

pH 值。pH 值是反映水的酸碱性强弱的指标。

泡沫。水体中泡沫多由表面活性剂引起。泡沫妨碍水的外观，还可降低氧气吸收率，从而降低水体自身的净化能力。

有毒物质。有毒物质是指其达到一定浓度后，对人体健康、水生生物的生长造成危害的物质。由于这类物质的危害较大，因此有毒物质含量是污水排放、水体监测和污水处理中的重要指标。有毒物质种类繁多，其中，氰化物和砷化物及重金属中的汞、镉、铬、铅等，是国际公认的六大毒物。

大肠菌群落数。大肠菌群落数是指单位体积水中所含大肠菌数目，单位为个/L，是常用的细菌学指标。

水体中有机物。水中有机物种类繁多，组成复杂，分子的尺寸大小范围广，但往往含量很低，有的只有痕量。因此常采用间接的方法即某些综合指标来表示水中有机物的相对含量。常用的综合指标有：生化需氧量、化学需氧量、高锰酸盐指数（耗氧量）、总有机碳、总需氧量、活性炭氯仿提取物、紫外吸收值等。有时挥发性悬浮固体、嗅阈值等水质指标也能粗略反映水中有机物质含量的多寡。

但是，随着各种合成有机物的种类日益增多，特别是它们当中不少是有毒、有害，甚至是致癌、致畸、致突变性的；同时也由于仪器分析技术的进步，逐渐加强了对一些重点有机物的测定。

化学需氧量（COD）。化学需氧量和高锰酸盐指数统称耗氧量或化学耗氧量。其定义是：在一定条件下，水中有机物被外加强氧化剂作用时所消耗的氧量。根据所用强氧化剂的不同，分别称为重铬酸钾耗氧量（习惯上称为化学需氧量）、高锰酸钾耗氧量（习惯上称为耗氧量、现又称为高锰酸盐指数）。

化学需氧量（COD_{Cr}）。反映了水中受还原性物质污染的程度，这些物质包括有机物、亚硝酸盐、硫化物等，但一般水和废水中无机还原性物质的数量不大，而被有机物污染是很普遍的，因此可作为有机物质相对含量的综合性指标。重铬酸钾是强还原剂，对大多数有机

物质氧化比较完全，故可用于污水和工业废水的分析。在加入硫酸银作催化剂时，直链脂肪族化合物可被氧化。对大多数有机化合物氧化率可达理论值的95%～100%。

高锰酸盐指数在现用测定方法规定的条件下，其氧化能力有限。水中的有机物特别是较复杂的有机物只能部分被氧化。因此不能反映污水或废水中有机物质的总量。通常多用于评估较清洁或污染不严重水体中的有机物含量。

生化需氧量（BOD）。在有溶解氧的条件下，水中可分解的有机物由于好氧微生物的作用被氧化分解为无机物，该过程所需的氧量称为生化需氧量。与其他类似的水质指标（化学需氧量，高锰酸盐指数）相比，生化需氧量更接近于天然条件下，有机物质进入水体后的氧化分解实际情况。所以，采用生化需氧量作为反映水体有机物量的综合性指标更有意义。

有机物在生物作用下的氧化过程非常缓慢，而且和温度密切有关。在20℃时，约需100多天才能全部氧化。为了可比较，规定在20℃时培养5d，此时大约有70%的污染物被氧化。由此测出的生化需氧量称为5日生化需氧量，以BOD_5表示。

水中有机物的好氧生物分解分两阶段：第一阶段为碳氧化阶段，主要是有机物碳被氧化和含氮有机物的氨化。这一阶段所消耗的氧量叫碳化生化需氧量。碳化生化需氧量称为第一阶段生化需氧量，又称完全生化需氧量。

第二阶段是由于有硝化细菌存在，而将氨（NH_3、NH_4^+）进一步氧化为亚硝酸盐NO_2^-和硝酸盐NO_3^-，称为硝化阶段。此过程中消耗的氧量称为硝化需氧量。

通常说的生化需氧量只是指碳化生化需氧量，不包括硝化需氧量。所以在生化需氧量测定过程中要尽量避免硝化作用的发生。对于一般的有机废水来说，硝化过程要约5～7d甚至10d以后才能显著发生，因此，在5日生化需氧量的测定中是可以避免的。但对某些含硝化细菌多的废水，测定时则需加化学药剂（如亚甲基蓝）以抑制硝化作用。

第一阶段生化反应的耗氧速率常数是天然水体自净过程和废水生化处理过程中的重要参数，与积存在的有机物量成正比。表2－50是不同水样的第一阶段生化需氧量。

表2－50　不同水样的第一阶段生化需氧量

水　样	碳化生化需氧量，mg/L
未经处理的污水	150～400
典型的生活污水	250
生化处理厂出水	10～30
轻度污染的河水	1～30
自来水	0～1

总有机碳（TOC）。总有机碳是水中有机物总量的综合指标。在高温条件下使有机物中的碳转变为CO_2后，根据测定的CO_2浓度计算其含量，以碳C的浓度（mg/L）表示。

测定时需扣除水中碳酸盐等无机碳。在测定时可将有机物几乎全部氧化，因此TOC比BOD或COD更能表示有机物的总量，常用于评价水体中有机物污染程度。

总需氧量（TOD）。指水中的还原性物质（主要是有机物质）在高温燃烧中变成稳定的氧化物时所需要的氧量，结果以O_2（mg/L）计。总需氧量反映几乎全部有机物完全氧化时所需的氧量，比BOD、COD和高锰酸盐指数都更为接近于理论的需氧量值。

TOD和TOC的比值可以提供水中有机物种类的大致信息。对于不含氮（N）、硫（S）、

磷（P）的有机物，理论上这一比值约为 $O_2/C = 32/12 = 2.67$。若比值大于 4.0，应考虑水样中有多量的含硫、磷的有机物存在。比值小于 2.6，应考虑水样中硝酸盐和亚硝酸盐含量较大的可能性，因为它们在高温催化条件下，会放出氧气。

活性炭氯仿提取物（CCE）。当有机物在水中的含量很低时，难于用生化需氧量、化学需氧量或高锰酸盐指数等水质指标进行测定，但大都能被活性炭吸附以及氯仿萃取，因此活性炭、氯仿提取物可用来作为有机物含量的另一项综合性指标。

紫外吸收值。水中多数有机物，尤其是不饱和烃和芳香族化合物在波长 220～260nm 处有强烈的吸收峰，可根据水样在 253.7nm 处的紫外吸收值（UVA）来确定有机物含量。这一个相对指标，对于比较同一来源的废水或污染水较方便。

三、各种水体污染及其环境生物效应

1. 水体热污染

水体的热污染来源于工矿企业，如火力发电厂、核电站、钢铁厂的循环冷却系统排出的热水，以及石油、化工、铸造、造纸等工业排出的含有大量废热的废水。据统计，100 万 kW 的火力发电站的冷却水耗用量为 30～50m^3/s，并能使水温升高 6～8℃。据世界能源会议 1970 年调查，美国的发电站每天冷却水用量达 4.4 亿 t，占其全国冷却水用量的 4/5，接近全国用水量的 1/3。水温升高会增加水体中化学和生物化学反应的速率，会使有毒物质的生物毒性增加。水温从 8℃升高到 18℃，氰化钾对鱼类的毒性增加 1 倍；鲤鱼 48 小时致死剂量在 7～8℃时为 0.14mg/L；当温度升高到 27～28℃时降为 0.005mg/L。水温升高可使一些鱼类及水生动物的繁殖率降低，但可使一部分藻类繁殖加快，使水体富营养化加剧，而使水体中的游离氧减少，使水体的生态环境恶化，使用价值降低。

2. 水体放射性污染

水体中放射性物质分为两大类：一类是天然放射性物质，即放射性本底。地壳中放射性铀（原子序数 92）的含量约为地壳质量的 0.0004%，而放射性钍（原子序数 90）的丰度约是铀的 3 倍。自然界中丰度最高（99.28%）的铀的原子量为 238，相对密度为 18.7，半衰期 4.50×10^9 年。最常见的天然铀是沥青铀矿中的铀，以氧化物形式存在，沥青铀矿多在沉积岩的岩脉中。自然界中丰度最高（接近 100%）的钍的原子量为 232，相对密度 11.2，半衰期为 1.39×10^9 年。钍矿多混在稀土金属矿中，如磷铈镧矿中钍含量可达 10%。海洋中天然放射性物质以 K^{40}含量最高，约 12.1Bq/L（Bq 中文名贝可，放射性活度单位，1Bq = 1 次核衰变/s），占海水天然总放射性的 90% 以上；其次是^{87}Rb 和^{238}U。第二类为人工放射性物质，如铀矿和钍矿的开采、提炼、浓缩加工时产生的放射性污水和废弃物，核电站、核技术设备（如放射性治疗仪等）的废料等。这些污染物都可能污染水体。由于核技术发展，排人海洋的放射性污染物的含量已相当可观。海洋生物通过生物体附着（鱼类的鳃和细胞组织吸收），并通过食物链富集放射性元素（见表 2－51）。

20 世纪 90 年代末，美国和北约曾对伊拉克和南斯拉夫使用贫铀武器。贫铀是在提炼放射性铀（^{235}U）过程中的副产品，其放射性比天然铀低 65%，平均可延续 4000～5000 年。有研究认为（1998），贫铀弹导致美国退伍军人和伊拉克公民中的癌症患者增加了 2～10 万人；伊拉克南部自 1991 年以来出现的怪胎、先天缺损、白血病、儿童癌症与贫铀武器不无关系。

表 2－51　海洋生物对放射性元素的富集系数

生物种类	^{80}Sr	^{137}Cs	^{65}Zn	^{60}Co	^{55}Fe	^{54}Mn
鱼类	0.1～0.3	10～20	3000～4000	28～80	500～3000	100～300
虾类	0.1～1	10～30	1000～4000	4000	1～4000	800
贝类	0.1～3.2	10～30	100～1000	100～800	8000～15000	1000～10000
藻类	1～10	1～10	100～1000	30～60	2～5000	1～2000

随核发电量的增加，核污染扩大，1970 年世界核电站发电仅 2400 万 kW，1985 年增加到 8 亿 kW，放射性污染程度有明显增加。目前在世界任何海区几乎都能测出^{90}Sr和^{137}Cs，整个海洋中^{90}Sr的总放射性约为 2.16×10^{17}Bq，^{137}Cs约为 3.24×10^{17}Bq。

3．*无机污染物*

无机污染物主要包括三大类，即无机有害和有毒污染物、金属污染物和水体富营养化污染物。

无机有害污染物主要指亚硝酸根（$—NO_2$）、硝酸根（$—NO_3$）、硫酸根（$=SO_3$）、磷酸根（$\equiv PO_4$）、氢硫酸根（—HS）、硅酸根（$—SiO_3$）等。亚硝酸根进入人体后与血红蛋白结合，形成失去输氧功能的变形血红蛋白，使机体缺氧导致呼吸衰竭。另外，亚硝酸盐在人体内还可能生成有致癌作用的亚硝酸胺，亚硝酸胺有致畸胎和遗传变异的可能。

硝酸根是亚硝酸根氧化的产物，但可在微生物作用下还原成亚硝酸根。婴幼儿的肠胃酸度较低，适宜于微生物生长，若饮用硝酸根含量过高的水，可使硝酸根还原为亚硝酸根，并对婴幼儿造成病害。

硫酸根来源于化工厂、选矿厂、钢铁或金属的酸洗厂、煤加工厂等。硫酸镁或硫酸钠对肠胃有刺激作用，可引起肠胃机能失调。

磷酸根以$—H_2PO_4$、$=HPO_4$、$\equiv PO_4$ 等三种形式存在于水中。$—H_2PO_4$ 来源于无机物和蛋白质的生物氧化；$=HPO_4$ 来源于磷矿；$\equiv PO_4$ 来源于动物的排泄物。磷酸根可作为水体被污染的标志。磷酸盐主要伤害人体的神经系统。

氢硫酸来源于动物蛋白或含硫蛋白质在还原环境下的分解，并可作为水体被有机物污染的标志。含硫化氢的水有刺激性臭味，除能使人体中毒外，还对水泥和金属有腐蚀作用。

硅酸在天然水中含量不高，人长期摄取过量硅酸，可导致高血压和动脉硬化。

无机有毒污染物是指氟（—F）、氰（—CN）、砷及硫（=S）化物。自然环境中的氟来自岩石风化和火山喷发，这些氟可进入水体。

氰化物。氰化物是指化合物分子中含有氰基（CN^-）的物质。根据与氰基连接的元素或基团是有机物还是无机物把氰化物分成两大类，即有机氰化物（如乙腈、丁腈、丙烯腈等）和无机氰化物。无机氰化物的应用与来源广泛，种类较多，按其性质与组成又分成简单氰化物（如 HCN、NaCN、KCN、NH_4CN、Ca（$CN)_2$、Hg（$CN)_2$ 等）和络合氰化物（如 Zn（$CN)_2^{2-}$、Cd（$CN)_2^{2-}$、Pb（$CN)_4^{2-}$ 等）。

大多数无机氰化物属剧毒、高毒物质，极少量的氰化物就会使人、畜在很短的时间内中毒死亡，还会使农作物减产，引起鱼类、家畜及人群急性中毒。

氰化物对温血动物和人的毒性大、作用快。在含低浓度（0.005mg/L）氰化氢空气中，很短时间内就会引起人头痛、不适、心悸等症状；在含高浓度（>0.1mg/L）氰化氢的空气

中能使人短时间内死亡；在中等浓度时2～3min内就会出现初期症状，大多数情况下，在1h内死亡。氰化氢对人的吸入毒性见表2－52。

表2－52　氰化氢对人的吸入毒性

暴露时间 min	伤害浓度（C） mg/L	半致死浓度（C） mg/L	致死浓度（C） mg/L
0.25	1.5～2.0	2.5～2.75	3.0～3.5
1	0.4～0.5	0.7	1.5
5	0.15	0.2～0.3	0.4～0.5
15	0.1	0.15～0.2	0.3

氰化物刺激皮肤并能通过皮肤吸收，亦有生命危险。在高温下，特别是和刺激性气体混合而使皮肤血管扩张时，容易吸收氰化氢（HCN），所以更危险。根据临床资料，氰化物对人的致死量剂量为：氰化钠150mg、氰化钾200mg、氰化氢100mg；人口服氢氰酸和氰化物的平均致死量为50～60mg（或0.7～3.5mg/kg体重）。CN^-进入人体后生成HCN，并能迅速地被血浆吸收和输送，与铁、铜、硫以及某些化合物中（在生存过程起重要作用）的关键成分相结合，使之不能吸收血液中的氧，导致细胞窒息和死亡。高级动物的中枢神经系统需氧量大，因此受到的影响也大，当供氧受到阻碍时，身体主要器官活动停止和机体死亡。长期接触氰化物的慢性中毒则易发生帕金森氏综合症。

动物对氰化物急性中毒症状为最初呼吸兴奋，经过麻痹、昏迷、痉挛、窒息最后死亡。狗、猫和猴则是有规律性呕吐。牛一次摄入氰化物致死量为0.39～0.92g，羊为0.04～0.10g，马为0.39g，狗为0.03～0.04g。牲畜因吸入氰化氢气体中毒的事例较少，而摄入含氰废水中毒死亡的较多，其原因主要是含氰废水因跑、冒、滴、漏或超标排放，流入河流或低洼地形成积水，牛、羊等牲畜饮水导致中毒死亡。

氰化物对水生物的毒性很大。当氰离子浓度为0.02～1.0mg/L时（24h内），就会使鱼类致死。氰化物对鱼类的毒性与环境有关，这是因为氰化物的毒性主要是氢氰酸的形成而产生的。因此，pH值的变化能影响毒性，在碱性条件下氰化物的毒性较弱，而pH值低于6时则毒性增大。另外，水中溶解氧的浓度也影响氰化物的毒性。氰化物对其他水生物也有很大毒性。如氰化物浓度为3.4mg/L时，48h水蚤亚目致死；浮游生物和甲壳类对水中的氰化物的最大容许浓度为0.01mg/L。水中微生物可破坏低浓度（<2mg/L）的氰化物，使其成为无毒物质，但要消耗水中溶解的氧，并产生一系列水质问题。

有研究表明，灌溉水中氰化物浓度小于1mg/L时，小麦、水稻发育正常；浓度为10mg/L时水稻开始受害，产量为对照组的78%。浓度为50mg/L时，水稻和小麦都明显受害，但水稻受害更严重，产量仅为对照组的34.7%，小麦为对照组的63%。水培时氰化物含量为1mg/L时，水稻发育受影响；浓度在10mg/L时，水稻生长明显受到抑制，产量比对照组低50%；浓度为50mg/L时，大部分受害致死，少数残存植株不能结实。含氰废水污染严重的土地，果树产量降低，果实变小。用含氰废水灌溉水稻、小麦和果树时，其果实中含有一定量氰化物。

氰化物的各种衍生物即氰、氯化氰、氰酸盐、硫氰酸盐也都有毒性，但毒性不相同，其中氰的毒性与氰化氢相似，氯化氰的毒性与氰化物相近，氰酸盐与硫氰酸盐的毒性较小。

世界各国对氰化物的排放标准不同，例如：美国规定饮用水中的氰化物为0.02mg/L以下；日本的水质标准规定氰化物为0.01mg/L以下；英国饮用水中氰化物最大允许浓度为0.02mg/L；原苏联规定，饮用水中，氰化物允许含量0.1mg/L，养鱼水中氰化物允许含量为0.5mg/L；法国饮用水中氰化物最大允许浓度要求检不出；世界卫生组织规定，鱼类氰化物中毒限量为0.03mg/L；我国规定：渔业水体中氰化物不超过0.02mg/L，饮用水中，氰化物含量不得超过0.05mg/L，农业灌溉水中氰化物含量不超过0.5mg/L。

含氰废水除了来源于氰化物自身生产过程以外，一方面是来自氰化物的应用，如氰化提金、电镀、金属加工等；另一方面是来自生产其他产品的过程中，如化肥厂、煤气厂、焦化厂、钢铁厂、农药厂、化纤厂等化学工业以及电镀废水、金银矿选矿废水、冶金高炉及焦炉的废水等。由于工业性质的不同，排出的含氰废水的性质、成分也不相同。即使同种工业产生的废水，含氰化物也相差很大。

天然地面水，一般不含氰化物。如发现氰化物，往往是人类活动所致。氰化物在被污染水体中常可检出，最常见的是能溶于水、对人体有剧毒的氰化钠、氰化钾和氰化氢等的单氰化物。对我国各地氰化电镀车间废水的调查发现，氰化物的浓度为20～70mg/L，最频值为30～35mg/L。近年来，不少企业改用无氰电镀工艺，减少含氰废水的排放。

砷（As）及砷化物。砷元素是一种黑色非金属，不溶于水、醇和酸类，毒性极低。在环境和生态系统中，砷在自然界中虽然极少但极为广泛的存在于地壳、土壤、海水、河水及大气中，并在所有生物体内都可检出。砷在地球上的浓度为：岩石0.2～15.0mg/kg、土壤2.0～23.0mg/kg、大气0.005～0.100μg/m³。鱼虾类、甲壳类生物体内砷含量为1.0μg/g（有机砷），海藻中有机砷和无机砷含量为10mg/kg级。表2－53是砷在环境中的平均含量。

表2－53　砷在环境中的平均含量

土壤 ppm	海水 ppm	海底沉积物 ppm	淡水 ppm	地下水 ppm	大气，ng/m^3		
					芝加哥	多伦多	北京
5～6	0.003	10	1.5～2	3	12	12	0.022

自然界中单质砷少见，但多以硫化物的形式存在于岩石和砷矿中，最主要的含砷矿物是雄黄AsS，雌黄As_2S_2、砷黄铁矿（毒砂）FeAsS、砷华（砒霜）As_2O_3、白砷矿As_2O_5、臭葱石$FeAs_2O_4 \cdot 2H_2O$。砷在某些矿物中的含量见表2－54。

表2－54　砷在某些矿物中的含量

含砷矿物	硫砷铜矿	砷黄铁矿	砷钴矿	雄黄	砷黄铁矿
平均含砷量，%	0.1	4	2.5	2	0.6
产地	阿根廷 美国	法国 德国	加拿大 德国	中国 美国	加拿大

砷化物的应用在中国有2000年的历史。北魏郦道元（公元446～527年）著《水经注》即有砷硫化物开采的记载；明代李时珍《本草纲目》记有砒霜（As_2O_3）冶炼及危害。1888年，Hutchinson证实砷制剂可治疗牛皮癣引起的皮肤癌。Holmgvist（1951）等指出砷化物的毒性，冶炼厂废气中As_2O_3可引起皮肤、眼结膜和呼吸道粘膜炎症。

砷的人为污染物来自冶金、制药、油漆、颜料和陶瓷等工业的废水。含砷矿石在开采、运输、加工以及最终利用等各个环节都有逸出并进入环境。如我国湖南某雄黄矿废水中砷含量高达150～400ppm，含砷废水排入地表时，污染河流和土壤。大量堆集的含砷废矿渣也造成污染。据估算，全世界每年由于硫化矿的煅烧而释放进入大气的砷达6.0×10^4t。我国湖北某有色金属冶炼厂各种炉窑、烟道排放的砷达226t/a，通过废水排放的砷为2.47t/a。污染区内随尘降到地面的砷浓度高达0.065g/（m^2·月）。土壤中的砷浓度高达66.38ppm，而该区土壤背景值仅为12.5ppm。化工生产、燃料的燃烧与含砷农药的使用也是砷进入环境的重要途径。如大连化工厂使用含砷高的硫铁矿制取硫酸，据1972年调查，每天排入大连湾的砷高达6t之多。煤中含砷量平均为5ppm，燃烧1t煤释放到大气中的砷是2.5g，按此计算，从1900年到1971年由此进入大气中的砷总量为2.9×10^5t。人类生产活动导致的砷污染一旦形成，很难在环境中消除，最终通过食物链或地面水、地下水进入人体，在体内蓄积而危害人体。

砷的不同形态决定了其水溶性和毒性的重大差异。环境中有机砷及无机砷的化合物是三价和五价的。砷及其化合物的毒性按下列顺序递减，即砷化氢（无机物或有机物）＞三氧化二砷＞亚砷酸＞砷酸＞砷的化合物（四个有机基团带正电荷的砷）＞单质砷。如亚砷酸比砷酸的毒性大60倍，砷的低氧化态比高氧化态的毒性更大。

砷通过空气、水和食物等途径经呼吸道、消化道、皮肤进入人体引起中毒。砷化合物主要影响中枢神经系统、毛细血管渗透性和新陈代谢等。由砷污染引起急性砷中毒曾发生多起。如1900年在英国曼彻斯特，由于制啤酒发酵时使用了含砷的葡萄糖，结果7000多人急性中毒，1000人死亡。1955年日本发生的森永奶粉事件，有12100人中毒，130人死亡。严重的砷污染还给当地经济和社会带来许多问题。印度西孟加拉州砷污染始见于1983年，是世界上最严重的砷污染地区，污染是由于当地居民饮用砷严重超标的地下水。调查表明：该州有8个郡750多个村落发生砷污染，污染面积达4万km^2，污染地区总人口3800万人，饮用被污染地下水的人数达440万人以上。在砷污染地区，皮肤病患者约22万人，与砷有关的疾病患者约30万人，砷污染导致的死亡率超过8%，人口结构中青年人口数量不能增加，说明砷污染已威胁劳动人口而成为重大问题。

人长期饮用含砷为0.1～4.7μg/mL的水会引起慢性中毒。长期接触砷引起的慢性中毒，较难发现，并容易被忽视。慢性中毒症状是从疲劳、倦乏感开始到心悸、腹痛、呕吐等，同时出现皮肤角化和色素异常沉着。头发中含有3ppm以上的砷，可能是砷中毒。1968年报道台湾省某地区井水中含砷量0.25～0.85ppm，37个村庄的40421人中有428人患砷引起的皮肤癌，发病率达1.059%。

血液的砷中毒表现为贫血症及白细胞减少。在某些工业区可能遇到砷化氢，严重的会引起血液中毒，表现为呕吐、头痛及呼吸短促。长期吸入空气中含量为2mg/m^3的砷化氢会引起黄胆和贫血。接触砷要引起皮肤病，严重时会导致皮肤癌及Bowen疾病。砷已被认定，可诱发皮肤癌、膀胱癌、肺癌、肝癌、肾癌、恶性脑肿瘤等。实验证明，砷对皮肤致癌的毒性浓度为0.20～0.25mg/d，各种砷化物对人的致死量为：砷化氢（AsH_6）0.10～0.15g，亚砷酸（As_2O_3）0.10～0.30g。WHO的研究认为，生活在浓度为0.2000mg/L的环境中，患皮肤癌的危险率为5.0%。在一年以上长期暴露的情况下，肝、肾毒性及致癌浓度水平为0.010～0.100mg/（kg·d）；皮肤和神经系统发生损害的浓度为0.001～0.010mg/kg。

砷还是致畸元素，可使人脑、肾发育不全及肋骨畸形。调查表明，砷污染可引起胎儿体

重明显降低，妇女流产率高，胎儿畸形率高。研究发现三价和五价砷都有致突变作用。

人体吸收的三价 As（Ⅲ）大部分在肝脏中甲基化为甲基砷酸（MAA）、二甲基砷酸（DMAA）、三甲基砷酸（TMA）后迅速排泄，即甲基化是人体的解毒机制。未被解毒的 As 仍以原形态残留在体内，与蛋白质与酶结合后长期滞留蓄积于皮肤中。无机 As（Ⅴ）先被还原为 As（Ⅲ），然后再按 As（Ⅲ）的途径代谢。经口摄取的砷大部分经过尿液排出，As（Ⅲ）在达到较高的吸收率后便快速排泄。甲基化的砷化物，与体内的组织和器官的亲和力小，能迅速从体内排出。人体中砷化合物的主要排泄途径为肾脏，其他途径有粪便、毛发、皮肤等。

在正常情况下，人每天从食物、水、空气中摄入砷总量为 100μg 左右，而每天从粪便、尿液、汗、乳汁中排出的总量也是 100μg，因此不会引起砷中毒。表 2－55 是各地域的人体的砷摄入量，当摄人量大于排出量时，对人体健康产生危害。

表 2－55　摄取砷的量

单位：μg/d

地　域	国　家	摄入砷量	地　域	国　家	摄入砷量
欧洲	奥地利	116	亚洲	中国	52
	法国	169		印度	29
	瑞士	101		日本	112
	英国	99		朝鲜	62
	苏联	80	北美洲	加拿大	105
非洲	埃塞俄比亚	39		美国	125
	南非	46	大洋洲	澳大利亚	116
	坦桑尼亚	56		新西兰	118

砷已列为食品检验、卫生标准、中药材出口和环境监测中重要项目之一。WHO 将饮用水中砷的浓度标准值暂定为 10.000μg/L，该浓度值下，皮肤癌终生风险率为 6×10^{-4}。美国环保局制定的饮用水标准中砷的含量上限为 5.0μg/L。欧盟执行 WHO 的标准，加拿大的标准为 25μg/L。如果一生中持续饮用砷浓度为 50.00μg/L 的水，皮肤癌发病率约 1/400。我国规定，饮用水中砷含量不得超过 0.05mg/L，居住区大气中砷含量不得超过 0.003mg/m^3，地面水中含砷的最高容许浓度为 0.05mg/L，农田灌溉水中含砷最高容许浓度为 0.05mg/L，渔业用水为 0.1mg/L，工业废水中砷最高容许排放浓度为 0.5mg/L。

金属污染物。水体中的金属污染物是指钙、镁、铁、锰、铜、锌、钼、钴、镍、锶、铍、钒、铷、铝等金属离子的化合物。

钙和镁是构成水硬度的最重要成分，含镁高的水，水味苦涩，摄人量过多，可引起肠胃功能紊乱。锅炉用硬度高的水容易结垢，会使能耗增加。

铁是人体必需的元素之一，铁化合物无明显毒性，但硫酸亚铁摄入过多，也会引起中毒，使皮肤色素沉集，肝脾肿大，糖尿病、心肌炎症状加重。

锰是人体所需元素，但摄人过多可引发麻痹震颤、记忆力下降、心动过速等慢性中毒症状。

铜和锌也是人体所需元素，但摄入过量的硫酸铜，会诱发肠胃炎、黄疸性肝炎等病症。锌的毒性较小，但摄人过量也会引起肠胃炎、消化道粘膜腐蚀等病症。

钼、钴、镍是人体所必需，人体摄入过量的钼会引发痛风症。三氧化钼对眼及鼻、口腔黏膜有刺激作用。从消化系统摄入过量的钴会使血液中的红细胞及血红蛋白增加，还可能引起甲状腺肿大。从呼吸系统吸入过量的钴对肺有损。金属镍毒性很低，但含镍盐类与皮肤接触，可能诱发湿疹、镍痒症；羟化镍是剧毒物并有致癌作用。

锶和铍在天然水中含量极少，摄入过量时，可引发大骨节病、佝偻病，还对肺有损害，使肺呈肉芽肿状改变。

钒在硫酸生产中用作催化剂，钒的盐类用于玻璃和染料制造、照相行业。五氧化二钒对人体危害最大，对眼、鼻、咽喉的刺激可诱发支气管炎和哮喘。

钡的污染物来自冶金、机械、染料厂的废水。钡的可溶性盐类（碳酸钡等）从消化道摄入后可导致四肢无力，呼吸肌麻痹等症状。

铝一般无毒，但长期过量摄入会影响人体对磷的吸收和代谢，还有研究认为过量铝的摄入与老年痴呆症有关。

在土壤中若某些金属元素的含量超过某个临界值，还可能引起植物病害（见表 2－56）。

表 2－56　引起植物病害的土壤中微量元素的临界浓度

元　素	致病害浓度下限值 mg/kg	致病害浓度上限值 mg/kg	有机体正常调节范围 mg/kg
铜	6～15	60	15～60
钴	2～7	30	7～30
锌	30	70	30～70
锰	400	3000	400～3000
钼	1.5	4	1.5～4
锶		6～10	0～6～10
碘	2～5	40	2～5～10
硼	3～6	30	3～6～30

注：摘引自陈静生等：环境地学，中国环境科学出版社，2001 年。

在金属污染物中还有一类特殊的污染物，即重金属有毒污染物。对重金属有以下几种理解：比重大于 5 者（有 45 种左右）；原子序数大于 20（钙）者，即从钪起为重金属。在环境污染中所说的重金属主要指汞、镉、铅、铬和类金属砷等生物毒性明显的元素，也指有一定毒性的锌、铜、钴、镍、锡等。目前最引起注意的是汞、镉、铬等。重金属中以汞毒性最大，镉次之（通常说的水体污染物五毒是：酚、氰、汞、镉、砷）。目前已证实，约有 20 多种金属可致癌，像铍、铬、钴、镍、镉等，钛、铁、镍等的有机化合物，钪、锰、锆、铅、钯等在某种情况下也能致癌，汞、铌、钽、金、镁则为特异性致癌物质。

重金属污染的特点是：在水体中不能被微生物降解，只能发生形态间的转化，从而产生分散和富集的迁移过程。某些重金属在微生物作用下可转化为毒性更强的重金属化合物。一般重金属产生毒性的浓度为 1～10mg/L；汞、镉在 0.01～0.001mg/L 以下；甲基汞通过食物链进入人体，经长期积累才显出症状，在人体内蓄积量达 170mg 时，人的听觉消失。

铬的污染物来源于电镀、制革、化工厂的废水。铬有三价及六价两种化合物，都有致癌作用；六价铬的生物毒性要比三价的大 100 倍。铬进入人体血液后能使血红蛋白变性，失去输氧功能而使人窒息。铬盐对肠胃黏膜及中枢神经都有伤害作用。

硒的污染物来自陶瓷、玻璃、染料、橡胶、电子等行业的废水。饮用水中硒的含量过低会诱发某些癌症，但硒含量过高也会引起中毒（所以，现在市场上出售的硒保健品一定要慎重选用！）。硒的生物毒性与砷类似，但有研究认为其毒性大于砷。硒在人体中聚集引起的中毒会损害肝脏和骨髓。

镉是一种银白色略带淡蓝色光泽的金属，稍加热即易挥发。镉蒸汽氧化生成的氧化镉在水中不易溶解。天然水中的镉大部分存在于底部沉积物和悬浮颗粒中，溶解性镉的含量很低。未受污染的水体中，镉的浓度＜1μg/L。在排放镉的工厂下方500m的水体中，镉含量为4mg/L，底泥含镉量为80mg/L。

镉是稀有金属，在自然界没有发现单独的镉矿。镉矿与锌矿共生。统计表明，锌矿中的Cd/Zn比值基本上是一个常数，美国国家环境研究中心认为有0.45%的镉伴随着锌矿岩石而风化。另外，镉也存在于铜矿、铅矿和其他含锌的矿石中。

镉污染物来源于采矿、冶炼、电镀、化工及纺织厂的废水。镉的主要用途是作金属的保护层，涂加颜色，塑料稳定剂，蓄电池。镉还用于合金、杀菌剂、农药、摄影和阴极射线屏等。在汽车用高级汽油中，镉浓度为＜0.001～0.03μg/L，普通汽油中则为＜0.08μg/L，所以汽车尾气废气中也有少量镉。据报道，1968年美国从各种途径散发到大气中的镉，相当于年总消耗量的34%。磷肥中含有镉，所以施用磷肥的土壤中镉含量高。镉对土壤的污染是镉污染的主要方面，其危险性在于作物对镉有富集作用，从而成为食物链造成镉中毒的主要来源。未被污染的土壤中含镉量不超过0.5mg/L。日本富山县神奈川流域用当地铅锌矿选矿废水灌溉农田，使土壤中的镉含量达7～8ppm，使农作物受到污染，居民长期饮用含镉河水，食用含镉的农作物及水生生物而得病。从此镉污染问题受到广泛关注。镉及其化合物在人体细胞中蓄积诱发骨痛病，影响骨骼中钙的置换，从而产生脱钙，使骨质软化和变形，后期可使骨骼软化萎缩并导致死亡。另外，镉还有致癌、致畸、致突变作用。

铅在地球上的分布和用途广泛，地壳中铅的含量为13mg/kg，主要用作蓄电池、电缆、合金、放射性防护材料和汽油抗爆剂，也是油漆、农药、医药的原料。有色金属冶炼及煤燃烧产生铅化物是大气中铅污染的重要来源。

在远离人类活动地区，空气中铅的浓度为0.0001～0.001μg/m³。目前日本、美国的大城市空气中，含铅量普遍达5μg/m³，较300多年前，增加了100～200倍。

地面水中天然铅含量的平均值约为0.5μg/L)，地下水中含铅量为1～60μg/L。城市雨水径流中的铅可造成水的铅污染，在交通繁忙的公路旁的雨水中含铅量达50μg/L。根据对大西洋海水的调查，表层海水含铅0.2～0.4μg/L，300～800m深处，铅的浓度下降，在3000m深处，仅为0.002μg/L，这说明海水表层的铅主要来自大气污染。据调查，北极冰川中近200年来钠含量变化不大，而铅含量却增加了20倍。

铅为积累性毒物，被肠胃吸收进入血液后扩散到全身器官，并在骨骼、肾脏中积累，影响神经系统功能。古罗马的贵族的生育率很低，是由于用铅管作自来水管，用铅制器皿盛酒和饮料，用铅丹作着色剂加入葡萄酒，日久引起铅中毒。

有机铅（四乙基铅和甲基铅）及其化合物均为剧毒物，经呼吸和消化系统进入人体，也可透过皮肤渗入体内，破坏组织和器官、损害神经胶质、引起细胞水肿、粘液性变和硬化，抑制血红蛋白合成代谢，导致中枢神经、造血系统、心血管疾病。所以严禁用含铅汽油洗手。

由于铅中毒对儿童的智能和体格生长有严重影响，所以近年来国内外对可致人体铅中毒

的铅污染问题十分关注。

汞是室温下唯一的液态金属。汞几乎不溶于水，20℃时的溶解度约 20μg/L。溶于水的一价汞盐有硝酸亚汞、氯化亚汞、醋酸亚汞；溶于水的二价汞盐有硝酸汞、硫酸汞、过氯酸汞、氟化汞、醋酸汞。大部分溶解的汞盐有氯化汞、氰化汞。几乎不溶的有硫化汞、碘化汞、硫代氰酸高汞等。在多数的地表水中，汞以氢氧化汞、氯化汞的形态存在。

汞和汞化合物在工业、农业、医药上有非常广泛的应用。20 世纪 60 年代估计，每年以工业废弃物散失在环境中的汞约（1.5～3）万 t，是岩石风化和火山喷发等天然释放量的 4.5 倍。美国氯碱工业的耗汞量占总耗汞量的 26%左右。生产 1t 苛性钠约消耗 150～260g 汞。我国吉化公司电石厂醋酸车间乙醛工段，1958～1982 年采用乙炔水合法生产乙醛。从开工到停产的 24.5 年中，共排放含汞废水 910.8 万 t（生产 1t 乙醛排放 20.1t 废水，其中汞的浓度为 69mg/L）。全世界煤和石油燃烧过程中释放的汞每年约 1600t。自 1953 年到 1969 年的 17 年间，日本每年使用的有机汞类农药平均约 400t，在耕地上共散布 6800t 以上的汞，使得日本大米中的含汞量由 1946 年的约 0.02ppm 增至 1966 年的 0.15ppm。汞的另一个重要污染源是废电池。目前，美国、加拿大、日本以及欧盟各国，已基本实现了电池无汞化，新型电池不含汞。我国的电池产量于 20 世纪 80 年代初超过美国，成为世界第一大电池生产国。1998 年，全世界电池产量 300 多亿只，我国产量达 140 亿只，其中大部分是含汞电池。蓄电池（即可充电电池）仅 5 亿余只（镍镉电池约 4 亿只，铅酸蓄电池 5000 万只），镍氢电池、锂电池等高品质、低污染的蓄电池不足 1 亿只。1999 年，我国消费电池约 70 亿只，其中含汞电池约 40 亿只（主要是低汞电池）。我国城市垃圾还未实行分类收集，废电池随生活垃圾混合收集、运输、堆放、填埋。其中的重金属（主要是汞）泄露，污染垃圾填埋场及附近的土壤、地下水。

汞进入水体后通过生物化学过程变成剧毒的甲基汞。汞及其化合物的脂溶性很强，在人体内聚集会伤害神经系统、心脏、肾脏及肠胃。

水体富营养化污染物。富营养化（eutrophication）一词来源于希腊文，意即“富裕”。“富裕的水”，指富含氮、磷等植物营养物的水。水体富营养化通常是指湖泊、水库和海湾等封闭性或半封闭性的水体，以及某些滞留（流速＜1m/min）水体内的氮、磷和碳等营养元素的富集，导致某些藻类（主要是蓝藻、绿藻等）等浮游生物的异常增殖；如果此时水体中的鱼类的消耗能力低于藻类的繁殖速度，水体中的藻类就越来越多，水面呈现蓝色、红色、棕色、乳白色，随占优势的浮游生物的颜色而异，使水体透明度下降，溶解氧降低，水生生物大批死亡，水变得腥臭难闻。如发生在江河湖泊等淡水中，称为“水华”；发生在海洋，则叫“赤潮”。因此，水体富营养化是赤潮（或水华）的先兆，赤潮（或水华）是富营养化的结果。

海水在正常情况下，由于受海流、潮汐和扩散等因素的影响，混合良好，海水中各化学元素的分布趋于均匀。海水的富营养化多发生在沿岸、河流入海口、海湾等受人类活动影响较强而水体交换不良的地区。海洋中浮游植物所需的营养成分很多，主要的有氮、磷、硅、有机物、微量元素及各类维生素。由于硅、有机物、微量元素和维生素在海水中的含量都比较大，一般不会成为浮游植物生长的限制因素。海洋中影响浮游植物生长的限制因素通常只有氮、磷两元素，向近海海域大量输送氮、磷是发生海水富营养化的主要原因。

自然界中一直存在着水体富营养化现象，所谓沧海变桑田，部分原因就是水体的富营养化：水体的富营养化使湖泊先变为沼泽，最后变为草原和耕地。这是个成千上万年的过程，

人类的活动使这一过程加快。许多水体的富营养化趋势越来越明显，如我国的滇池、太湖水系，美国的五大湖等。以美国 Erie 湖为例，由于大量的营养物质排入 Erie 湖，该湖在 1900 年到 1970 年的 70 年间发生的富营养化进展相当于过去 10000 年的发展结果。大量含氮、磷的肥料的生产和使用，食品加工、畜产品加工等工业废水和大量城市生活废水特别是含磷洗涤剂废水未经处理或仅经一、二级处理即排放，成为当今水体富营养化过程的主要物质来源。磷（以三聚磷酸盐的形式）以其优良的助洗性能在洗涤剂工业中得到非常广泛的应用，进而大量进入天然水体。据对我国太湖地区的调查表明，以助洗剂的形式排入水体的磷占到磷过肥化的 13.4%，在发达国家，则高达 20% 左右。

农业等面源（或非点源）污染也是引起水体富营养化的很重要污染源。统计表明，美国在 20 世纪 70 年代后期，农业污水引起的水体生化需氧量的增加比城市污水和工业废水大 5～6 倍；对非点源污染进行了鉴别和测量，发现农田径流是全国 64% 河流污染和 57% 湖泊污染的主要污染源。英国地表水中的磷 43% 来自于农业，24% 来自于人类排泄物和其他生活污水，19% 来自于合成洗涤剂。瑞士雨水径流中氮、磷含量相当于工业废水和城市污水中这类污染物量的总和。瑞典西海岸的拉霍尔姆湾，由河流输运的氮 60% 来自农业，瑞典最南端的谢夫灵厄流域，来自农业的氮占此流域总输入氮量的 84%～87%。我国 75% 磷用于制造磷肥，用于合成洗涤剂的约 10%，其余用于饲料、农药、化工等行业。据统计，近年来每年排入滇池的磷有 1000t 左右，其中工业污染源占 14.4%，生活污染源占 44.8%，面源污染占 40.8%。

化肥使用量增加是水体富营养化的重要原因，联合国粮农组织（FAO）的报告认为："百年来粮食大幅度增产的诸因素中，化肥所起作用占 50% 左右"。我国 1952～1990 年粮食增产了 31.65 倍，棉花增长了 2.43 倍，油料增长了 2.58 倍，而同期化肥产量增长了 489 倍。我国化肥的亩施用量超出世界平均水平 1 倍多，而且还在逐年增加，但效率下降，在著名蔬菜产区山东寿光，化肥有效利用率仅为 1%。表 2－57 是我国每亩耕地化肥平均施用量增长情况。

表 2－57　我国每亩耕地化肥平均施用量的增长

年　份	1950	1960	1970	1980	1985	1990	1995
施用量，kg	0.05	0.4	2.3	8.5	12.2	18.05	20.0

作物对氮、磷肥的利用率很低。在土壤—作物系统中，氮素的作物利用率仅为 20%～35%，大部分被土壤吸附，逐渐供作物吸收利用，有 5%～10% 挥发到大气中。随降水径流和渗漏排出农田的氮素中有 20%～25% 是当季施用的氮素化肥。地表水（湖泊等）硝态氮的污染中，氮素化肥占了 50% 以上。我国苏南太湖流域，农业面源氮素对地表水的污染负荷量高达 2.55×10^{4}t/a，占氮素化肥施用量的 16.8%。作物对磷肥的利用率，通常情况下当季作物只有 5%～15%，加上后效一般也不超过 25%。所以约占施肥总量 75%～90% 的磷滞留在土壤中。长期而过量地施用磷肥，导致农田耕层土壤处于富磷状态，可通过径流等途径加速磷向水体迁移的速度。据估计，全世界每年大约有 300～400 万 t P_2O_5 从土壤迁移到水体中。美国每年由化肥和土壤进入水生态系统的磷达 4.5 万 t 左右。日本水田磷的排出负荷量为 0.3～8.4kg/（$hm^2\cdot a$）。我国有研究（张水铭等）表明，采用封闭体系和磷素平衡法对农田排水磷负荷量进行的实验表明，在雨水较丰富的 1987 年苏南太湖地区排出磷负荷

总量440t/a，耕地平均排出量537g/（$hm^2 \cdot a$），旱地排出固体物质的含磷量占总磷量的78.7%。

另外，水体富营养化物质的来源还与土壤侵蚀、地表径流、水土流失等面源污染有关。人类的活动使得水土流失的程度提高了2～3倍，美国每年因暴雨冲刷而带入水体的土壤为35亿t，其中约170万t磷排人水体，因地表径流损失的农田氮素每年为450万t。原苏联因地表径流造成土壤全氮损失每年达300万t，溶解氮损失每年达46万t。我国水土流失的国土面积已达国土总面积的38%，每年流失土壤50亿t，仅重庆市每年流失的土壤就达2亿t。我国全年因流失土壤带走的氮、磷、钾等养分约相当于全国一年的化肥施用总量。

水体富营养化的指标，从测定的项目上分，大致可分为物理、化学和生物学三种指标，这些指标是衡量富营养化的尺度。目前判断水体富营养化采用的指标是：氮含量超过0.2～0.3mg/L，磷含量大于0.01～0.02mg/L，BOD大于10mg/L，pH值7～9的淡水中细菌总数超过10万个/mL，叶绿素—a含量大于10μg/L。水体叶绿素—a含量反映水体中植物体的含量。水体富营养化指标中无机氮含量的规定值远大于总磷规定值，说明磷在水体富营养化过程中的作用远大于氮。磷的排入对水体富营养化起着相当重要的作用。当磷含量达到0.6mg/L时，藻类产量几乎不受水中氮元素含量的制约。但也不能因此而忽视高浓度氮的作用。判断水体富营养化的指标是用统计方法得出规律。

表2－58是我国25个湖泊中总氮总磷浓度（mg/L）及所占比例。表2－59是中国18个湖泊富营养化的监测数据。表2－60是我国近海水体无机氮超标率（1995～1998年）。据对我国25个湖泊的调查，水体总氮几乎都超过了富营养化指标，总磷只有个别湖泊低于0.02mg/L的临界指标，其余90%多的湖泊皆超过了标准，比国际标准高出10倍以上。如滇池、巢湖、甘棠湖（九江）、西湖、东湖、玄武湖、蘑菇湖（石河子）、于桥水库（天津）等早已是富营养湖泊。我国第三大淡水湖——太湖，目前97%面积的水体已呈中富营养化状态。富营养化使太湖近几年大面积爆发蓝藻，大规模地影响到自来水厂取水。

表2－58　我国25个湖泊中总氮总磷浓度（mg/L）及所占比例

湖泊数及所占百分比	总氮				总磷			
	<0.2	>1.0	>2.0	>5.0	<0.02	>0.1	>0.2	>0.5
湖泊数	0	21	13	5	2	16	12	6
占百分数，%	0	84	52	20	8	64	48	24

表2－59　中国18个湖泊富营养化监测数据

湖泊名称	总磷 mg/L	耗氧量 mg/L	透明度 m	总氮 mg/L	生物量 万个/L
青海湖	0.02	1.40	4.50	0.22	14.6
太湖	0.02	2.83	0.50	0.90	160.0
呼伦湖	0.08	8.29	0.50	0.13	11.6
洪泽湖	0.10	5.50	0.30	0.46	11.5
巢湖	0.03	6.26	0.25	1.67	25.3
滇池	0.02	10.13	0.50	0.23	189.2
抚仙湖	0.02	1.61	7.03	0.21	19.0

续表

湖泊名称	总磷 mg/L	耗氧量 mg/L	透明度 m	总氮 mg/L	生物量 万个/L
武汉东湖	0.11	10.70	0.40	2.00	1913.7
杭州西湖	0.13	10.30	0.35	2.76	6920.0
草海	0.18	51.00	0.41	2.86	7060.0
外海北	0.06	3.37	0.87	1.08	945.0
外海中	0.04	3.53	0.92	0.87	916.0
外海南	0.04	3.68	0.90	0.96	1011.0
洱海	0.03	2.11	3.30	0.49	22.4
此碧湖	0.05	2.05	1.50	0.52	8.9
云西湖	0.03	3.70	1.60	0.50	8.0
海西湖	0.05	1.28	3.50	0.32	7.3
云南大池	0.02	4.05	1.20	0.62	51.6

注：摘自杨红等：中国湖泊的富营养化评价研究，陕西师范大学学报（自然科学版），2000年，28（4）。

表2-60 我国近海水体无机氮超标率（1995～1998年） 单位：%

海区	1995年	1996年	1997年	1998年
渤海区	65	60	44	45
黄海区	41	58	46	46
南海区	94	83	94	78
东海区	58	52	42	28

注：摘引自刘海洋等：中国近海污染现状分析及对策，环境保护科学，2001，27（4），6～8。

富营养化对水质的影响和危害，是使水变得腥臭难闻，降低水体的透明度，水体的溶解氧降低，向水体释放有毒物质。富营养化水中的某些藻类能够分泌、释放有毒物质，有毒物质进入水体后，被牲畜饮入体内，可引起牲畜肠胃道炎症，人若饮用也会发生消化道炎症。水体富营养化还影响供水水质并增加制水成本，对水生生态环境的影响，破坏水生生物的稳定性和多样性，破坏了湖泊生态平衡。

尽管现行的法律法规对工业污染物的排放要求很严格，但对氮、磷的控制却不够。受技术经济的制约，未能有效地去除污水中的氮、磷。当前沿海地区人口的大量增长，生活污水及氮、磷的排放总量呈快速增长。由于富营养化的发生比污染的排放滞后，因此解决水体富营养化应以预防为主。富营养化问题的防治措施有：禁用含磷合成洗涤剂；减少水土流失；在农业区大力发展生态农业；污水的除磷；水域的综合整治等。

4. 有机污染物

据Degens1965年计算，地壳中有机物约为 3.8×10^{15}t，其中石油 0.2×10^{12}t，占有机物总量的1/16000。已知有机化合物在1880年约为12000种，1940年约为50万种，1961年约为175万种。天然有机物（NOM），包括腐殖质、微生物分泌物、溶解的植物组织和动物的废弃物。另外还有大量人工合成的有机物（SOC）。

水中有机污染物的来源有二：一是向水体中排放的有机物，包括地面径流和浅层地下水从土壤中渗出的腐殖质、农药、杀虫剂、化肥等；还有城市污水和工业废水中的有机物、大

气降水挟带的有机物、水面养殖投加的有机物、各种事故排放的有机物等。二是水体中生物体产生的有机物及底泥释放的有机物，这类污染物所占的比例很小，但对于富营养化的湖泊、水库，则是不可忽略的因素。

天然有机污染物指生物在生命过程中产生的大分子有机物，其中腐殖质在地面水中含量最高，是影响水体色度的主要因素，占有机物总量的60%～90%。

在水体和土壤中的有机物分两大类：构成生物体的物质，如各种碳水化合物、木质素、树脂、蛋白质等，约占有机物总量的10%～15%；广泛存在于土壤、河流、湖泊以及海洋中的腐殖质（在土壤中约占有机质总量的85%～90%），是有机物在微生物直接参与下，重新合成的新物质。腐殖质仍可以由微生物再缓慢分解，并在环境中积累。研究表明，海水中有机碳含量为0.5～2.0mg/L，其中主要是可溶有机物，已确认的有氨基酸、糖类、脂肪酸等，约占可溶有机物的10%左右，其余大部分是腐殖质。腐殖质在海水中浓度仅0.003～0.8mg/L。腐殖质各种元素的比例为：C，50%～60%；O，30%～35%；H，4%～6%；N，2%～4%；S，0～2%。淡水中90%以上的Cu、Hg都能被腐殖质络合，而其他金属不到11%；海水中99%以上的腐殖质都能吸附Ca、Mg。多数核裂变产物能被腐殖质吸收，所以腐殖质也是处理核废料的物质之一。

卤化烃是水体中另一种有机污染物，主要来自饮用水。1974年美国和荷兰学者首先在水中发现三氯甲烷、四氯甲烷、一氯二溴甲烷等。1976年发现，三氯甲烷可以使实验鼠致癌。有报道认为，美国人从饮水中摄入的三氯甲烷量最高达343mg/（人·年），平均为64mg/（人·年）。日本人从饮水中摄入的三氯甲烷占总摄入量的70%。1979年美国环境部门规定，饮用水中三氯甲烷含量应在0.1mg/L以下。我国各种地面水均含有三氯甲烷，含量属于ppb级水平，属痕量有害污染物。表2－61是1989年西安市水中三氯甲烷的含量水平数据。

表2－61　西安市水中三氯甲烷的含量水平（1989年）

水样类型	样品数	含量，ppb	
		含量范围	平均值
自来水	19	10～85	52
河水	4	30～87	50
深井水	5	0～5	1

氯气由于具有杀菌力强、价格低廉，一度成为使用最多、应用最广的杀菌剂。城市饮用水主要用氯对自来水消毒时，游离氯会和腐殖质作用生成卤代烃，生成量与水中腐殖质含量成正比，有毒或致癌等副作用。另外，若水中含酚，即使其浓度只有0.002～0.015ppm，氯化也会产生氯酚，使水恶臭而无法饮用。

若改用紫外线杀菌或用臭氧消毒，成本过高，水中的乙醛和碳氢化合物与臭氧反应，可能会生成危害人体健康的环氧化合物和过氧化合物。另一途径是除去水中的有机物，但实施相当困难。利用吹气或煮沸，均可很快除去水中较多的三氯甲烷。但是氯气作为长期使用的杀菌剂，会产生有致癌作用的有机氯衍生物。另外，当水的pH值大于9时，氯气的杀菌作用明显降低，长期使用还会使细菌产生抗药性，迫使氯气的用量增加。被称之为“第四代”广谱杀菌消毒剂的二氧化氯，其氧化能力是氯气的27倍，通过在水中分解出氯气穿透细胞

壁，使蛋白质变性而实现消毒。每升水中只需加含3%的二氧化氯的水溶液0.4mg就可使杀菌率达99%以上。二氧化氯可用于自来水、医院、食品、饲养、蔬菜等杀菌及漂白，在工业上也可用来杀灭厌氧菌、铁细菌、硫酸盐还原菌，并可抑制水垢产生。对氰化物、硫化物、酚类、胺类等污染物有分解作用，还可除去有机胺类、有机硫化物引起的水质异味。

人工合成有机污染物。美国《化学文摘》中登录的化学物质已达600万种之多，其中人工合成的有机物在10万种以上，且以每年6000种的速度递增，大部分是在自然界中从未发现的化合物。1973年美国职业卫生研究所所列出的毒物有25043种。据估计，已有96000种化学物质进入了人类环境。全世界人工合成化学物质，1950年产量约700万t，1970年6000多万t，1985年达2.5亿t。据估计，在过去的100年间，人工合成的化学物质，在全球的浓度从稍大于零增加到约1ppb。如果工业产量每年递增2%～3%，预计全球化学物质的浓度100年后会增加到ppm级。1977年美国环保局根据有机污染物的毒性、生物降解的可能性以及在水体中出现的概率等因素，从7万种有机化合物中筛选出65类129种优先控制的污染物，其中有机化合物114种，占总数88.4%，包括21种杀虫剂、26种卤代脂肪烃、8种多氯联苯、11种酚、7种亚硝酸及其他化合物。现有的传统水处理工艺对有机物的去除效率一般为20%～50%，对氨氮的去除效率为10%左右，处理后水中有机物含量仍然很高，且其中有些有机物有致癌性。

酚类。酚分为一元酚和多元酚。依据能否与水蒸气一起挥发又分为挥发性酚和不挥发性酚，沸点在230℃以下的单元酚称挥发性酚，沸点在230℃以上的酚称为不挥发性酚。自然界存在的2000多种酚类化合物大部分是植物生命活动的产物，因此将植物体内所含的酚(主要形式为多元酚及其衍生物)，称为内源酚，其他则称为外源酚。酚类化合物都具有特殊的芳香气味。其中，苯酚的毒性最大，通常含酚废水中又以苯酚和甲酚含量最高。因此，目前环境监测中以苯酚、甲酚等挥发性酚为污染指标。

水体中酚污染物主要来源于工业（如焦化厂）废水。大气中酚主要来自炼焦、炼油、煤气、制酚等生产过程。此外，动植物和微生物的代谢和腐败等，都产生少量的酚。

苯酚有臭味，溶于水，毒性很大，能使细胞蛋白质发生变性和沉淀。水体中酚的浓度为0.1～0.2mg/L时，鱼肉有酚味。1956年，石油工业含酚废水排入日本伊势湾，使附近水及水中的鱼发出恶臭。长期饮用含酚水，可引起头昏、贫血及各种神经系统症状，甚至中毒。

多氯联苯（PCBs）。多氯联苯广泛用于电器绝缘材料和塑料增塑剂等，是一种稳定性极高的合成化学物质，在环境中不易降解，不溶于水，但溶于油或有机溶剂。在生物体内相当稳定，一旦进入体内就不易排泄，而易聚集在脂肪组织、肝、脑中，引起皮肤和肝脏损害。日本人脂肪组织中多氯联苯含量高于1ppm的占35.8%，低于1ppm的占64%；美国人脂肪组织中多氯联苯高于1ppm的占32.5%，低于1ppm的占33.3%；英国人和加拿大人检出率为34%和30%。这可能与日本人食鱼较多有关。海水中有PCBs能影响浮游生物的生长繁殖，如0.1mg/L可以完全抑制牡蛎壳的生长。PCBs污染已成为环境污染中最具代表性的物质，污染了地表水和海洋。南极和北冰洋的企鹅、鲸体内均已检测出PCBs。

多环芳烃（PAH）。多环芳烃是由石油、煤、木材、可燃气体在不完全燃烧或高温处理条件下所产生的，是重要的致癌物质。其种类有：致癌的，苯并[a]芘、苯并[a]蒽、蒽、二苯并[a，h]蒽、二苯并[a，h]芘等；助癌剂：萤蒽、芘、苯并[e]芘等。多环芳烃是有多个苯环的有机化合物，一般都有毒，一些多环芳烃产品如萘（俗名卫生球）已禁止使用。多环芳烃能通过废油、含油废水、路面柏油排水等渠道进入水体并形成污染。

农药。农药是环境污染的主要污染源之一。第二次世界大战以前，农用杀虫剂主要是砷化物、石灰、硫混合物、石油衍生物、鱼藤酮等。这些农药对鱼类虽有毒，但尚未对水生生物构成威胁。第二次世界大战期间，有机氯农药，主要是滴滴涕（二氯二苯基三氯乙烷，俗名 DDT）和狄氏剂研究成功，这些新农药杀虫能力强、药性持久、易于喷洒，成本低，因而行销全球。全世界已经累计使用 DDT 达 150 亿 t 以上，虽然早已禁用，但已有 100 亿 t 流入大海。

有机氯农药是农药中的一大类，其特点是生物毒性高（属高效农药）、难分解、易残留。通过食物链和生物的富集形成污染。进入人体后积累可导致慢性中毒，影响神经系统和肝脏的功能。有机氯农药中最著名的是 DDT，1874 年由三氯乙醛和氯苯在硝酸存在的条件下发生反应制得 DDT。但直到 1939 年才由瑞士化学家米勒（P.H.Muller）发现 DDT 对虱子、跳蚤、蚊子（依次为斑疹伤寒、鼠疫、疟疾和黄热病的传染媒介），以及若干农作物的害虫都有很好的毒杀效果。纯 DDT 为无色晶体，熔点 109℃，工业品为无色无定形粉末，可溶于汽油类溶剂或悬浮在水中，通过喷洒杀虫。由于多年使用 DDT 使许多昆虫繁殖了抗 DDT 的种群。又由于 DDT 高度稳定可在昆虫体内积累并可能被以昆虫为食物的鸟类或其他动物摄入体内，因而使这些动物中毒。到 20 世纪 60 年代 DDT 作为杀虫剂的价值已急剧下降，1972 年美国对 DDT 的使用做了严格的限制。

目前，全世界约有 1500 种农药，复配成的商品在 1 万种以上。20 世纪 60 年代末，世界农药年产量 400 万 t 左右，20 世纪 90 年代则超过 3000 万 t。农药施用量还以每年 10%的速度递增。西欧和北美使用了世界上除草剂的 70%，发展中国家使用了杀虫剂的 62%，而农药量的 80%是在发达国家使用，发展中国家中的农药施用量尽管较小，但用量呈几何级数增长。目前，全世界使用的有机合成农药就达 1000 多种。我国每年的农药施用量已达 100 万 t 以上。中国现有原药生产企业近 400 家，其中大中型企业近 20 家，可生产农药 160 种，制剂 500～600 种，原药生产能力约 50 万 t/年，排名世界第二。中国每年使用农药 100 万 t 以上（折合原药 30 万 t），人均消费约 1kg，但利用率仅 1/3。20 世纪 40～50 年代是现代农药工业发展的初期。自 20 世纪 60 年代以来世界农药飞速发展。1960 年全世界销售不足 10 亿美元，1972 年达 125 亿美元，1983 年达 205 亿美元，1993 年达 275 亿美元，1998 年达 340 亿美元。我国从 1952～1990 年粮食增产了 31.65 倍，棉花增长了 2.43 倍，油料增长了 2.58 倍，而同期农药增加了 113 倍。

喷洒的农药只有 10%～20%作用于农作物，其余 80%～90%残留在土壤和漂浮在大气中，通过降雨、径流进入地表水和地下水。

我国目前使用的农药以有机氯农药为主，许多省份有机氯农药所占比例已超出 50%，平均施用量达 0.72kg/亩。从 1983 年开始使用有机氯农药以来，出现了一大批有机磷与氨基甲酸酯类“取代农药”。这类农药大部分属剧毒药品，虽然在环境中降解快、残留期短，但其毒性大，触杀面广，引起的中毒伤亡事故非常突出。1995～1996 年黑龙江、江苏、广东等省农药中毒伤亡人数达万人，死亡数千人。据 1992～1996 年对 26 个省市的统计，发生 247349 例农药中毒案件，死亡 24612 人，死亡率为 9.95%。

农药可以通过食物链在人体内积累，如 1964～1965 年美国分析了 216 种食品，有机氯农药残留很普遍。1970 年一些食品中有机氯农药的检出率仍高于 67%。1969 年加拿大检测了 600 种待出售的食品，发现 70%的食品中农药残留量超过允许值。1983 年以前，我国有机氯农药的用量占总用量的 60%左右，1974～1977 年，卫生部门对 16 省市自治区的 7700

多份农畜产品及人奶样品检验，发现其中50%以上的样品含有六六六，而动物性样品及乳类几乎100%含有六六六，80%多的肥瘦肉中六六六超过允许标准。我国出口的农副产品中由于农药残留量超标，屡屡发生被拒收、扣留、退货、索赔、撤消合同等事件，影响了我国的国际信誉与对外贸易。土茶叶中DDT超标，蜂蜜中含有杀虫醚，苹果中含有甲胺磷，冻猪肉、冻兔、冻鸡中农药残留量超标等等。

农药是一种主要的可致癌、致突变、致畸变物质，其致畸作用直接危害后代的正常发育，而致癌和致突变作用的潜伏期可达数十年以上。目前我国仍有相当一部分具有“三致”作用的农药还继续生产使用。农药品种繁多，施用面广，除了危害人体健康外，还破坏生态平衡，威胁生物多样性。大量昆虫遭杀灭后，许多鸟类失去食物来源，导致种群衰亡。如呋喃丹是我国生产量较大的农药品种之一，使用范围遍及全国各地。目前生产厂家与产量还在增加。呋喃丹对禽鸟类的经口急性致死剂量在1mg/kg以下，1粒呋喃丹颗粒制剂就足以使1只较小的鸣禽致死。另外，我国农药生产、运输、销售和使用中还缺乏有效管理，各类污染事故经常发生，造成巨大损失。1995年7月至1996年8月，黑龙江、江苏、广东等19个省、自治区、直辖市共发生药害2000多起，药害面积200多万亩，经济损失近5亿元。如果将其他地区的药害统计在内，总损失将近10亿元。

农药是油溶性的，在水中溶解度很低，海洋生物对这类物质具有很高的富集能力，一般通过食物链或直接由鱼鳃、生物膜、细胞壁进入体内，并蓄积于脂肪含量较高的皮脂、鱼卵、内脏、脑中，富集系数可达几千倍到几万倍（见表2-62）。DDT浓度对各种生物的影响不同，如1μg/L时就会抑制小环藻的光合作用，10～100μg/L时抑制硅藻的光合作用，而有的绿藻即使1000μg/L也不见明显的影响。

表2-62 各种生物对DDT的富集能力比较

食物链	DDT含量，ppm	富集倍数
水	0.00003	
浮游生物	0.04	1300
小鱼体内	0.5	17000
大鱼体内	2.0	66700
水鸟体内	25.0	833000

洗涤剂。1907年，现代洗涤剂从德国开始发展。当时洗涤剂的4种主要成分是：以肥皂为表面活性剂，以碳酸钠与硅酸钠为水软化剂并提供碱；以过硼酸盐为漂白剂；以硫酸盐为粉状产品的填充剂。以后不断有新的组分加入到洗涤剂中。如以烷基硫酸盐代替肥皂作表面活性剂，以聚磷酸盐取代无水碳酸钠作水软化剂，羧甲基纤维素钠（CMC）作为抗再沉积剂。20世纪50年代开始使用活性剂四聚丙烯基苯磺酸盐TPS，三聚磷酸钠作为助剂。目前，三聚磷酸钠仍被认为是性能最好的助剂。20世纪50年代洗涤剂配方使用棉纤维用光学增白剂，加入山嵛酸盐肥皂作为泡沫抑制剂，加入香料以掩盖洗涤液所产生的异味，并给衣物加香。20世纪60年代，由于TPS不易生物降解，开始用一种可生物降解的直链烷基苯磺酸盐（LAS）代替。1964年，由不可降解的TPS在河流中产生的堆如山的泡沫开始从德国消失。

由于水体的富营养化与洗涤剂中磷酸盐的使用有关，因此洗涤剂行业开发磷酸盐的替代

品，出现无磷洗涤剂，后又开发出加酶洗涤剂。

洗涤剂不仅用于洗涤衣物，还用于洗涤餐具、蔬菜等，洗涤剂用量增加，造成了污染。洗涤剂像洗衣粉中的许多化学原料，如三聚磷酸钠、硅酸钠、表面活性剂、荧光增白剂等，都是有害有毒物质。硅酸钠具有腐蚀性，对皮肤有强烈的刺激作用，表面活性剂有毒，大剂量进入人体会致死，即使少剂量进入，长期积累，也会诱发肝癌等疾病；荧光增白剂会使人体细胞发生异变，诱发癌症，使皮肤过敏、瘙痒，引发皮炎，甚至还会影响生育。

水体中洗涤剂浓度大于 10mg/L 时鱼类就难以生存。中国科学家 1993～1994 年赴南极考察时对各考察站附近阴离子洗涤剂的污染状况进行测量，测量值介于 0.148～0.997mg/L 之间。阴离子洗涤剂的主要毒害作用是影响鱼卵的正常发育。南极近海的大量鳕鱼对十二烷基磺酸钠（LAS）敏感，虽然测得的浓度低于国内地表水水质标准，但当 LAS 含量 > 0.02mg/L 时，鳕鱼卵的孵化率下降 40%，且 66% 的初孵仔鱼脊椎骨畸形。

大量使用的各种洗涤剂，形成的污染，已成为不可忽视的环境问题。科学家一直在寻找对人体和环境都较温和的洗涤剂配方。如利用葡萄糖和脂肪醇或脂肪酸生产的烷基多苷（APG）和葡糖酰胺（APA）这两种新型非离子表面活性剂和各种酶制剂。但其价格过高，作为洗涤剂成分难为消费者接受。现在科学家们还在积极开发既能被消费者接受又对环境无害的洗涤剂用品。

开发和使用无磷洗涤剂是目前的一大趋势。20 世纪 70 年代，欧洲、北美的一些水体相继富营养化，由于水体的富营养化和磷污染有关，为此，部分欧美国家地区、日本相继控制和禁止含磷洗涤剂的生产和应用，比如在意大利、瑞士、挪威禁止使用含磷洗涤剂，同时在德国、荷兰和澳大利亚，不再出售含磷洗涤剂。但经过几十年的实践，发现水体富营养化并无明显改善。无磷洗涤剂也产生了一系列污染问题。最近几年，全球洗涤工业界对有磷、无磷洗涤剂的作用已开始重新认识。2000 年 8 月，在成都举行的国际表面活性剂会议上，英国利物浦大学莱斯教授提出，磷并不是造成富营养化的主要因素。在其他地区，控制氮比控制磷更为重要。判断产品是否有利于环境要从产品的生命周期考虑，仅仅以其中部分成分为判断依据是无意义的。这些观点受到了洗涤工业界的广泛响应。预计在未来几年，对限磷、禁磷的争论仍将继续。

有机金属化合物。有机金属化学是一门边缘学科。其研究可追溯到 19 世纪 20 年代，但直到 1951 年 $(C_5H_5)_2Fe$（双环戊二烯基铁）被合成后，才开创了有机金属化学发展的新时代。此后几十年，新的有机金属化合物大量出现。随着它在工农业及医药领域的生产和应用，这类化合物进入环境后的变化及生态效应渐渐引起注意。另外，环境中的无机金属在适当条件下可以转化为有机金属化合物。研究环境中有机金属化合物的发生、分布、迁移、转化的途径及有机金属化合物的生物效应，成了环境化学及相关学科的新领域。由于有机金属化合物在环境中的含量很低，其在环境中的许多反应机理，演变规律和分析方法都不很清楚。

科学上最为关注的有机金属化合物有：

有机汞化合物：苯基汞在造纸中用作杀菌剂，在船舶抗附着涂料中含量达 2%～5%。

有机铅化合物：用量最大的是四乙基铅，据估计北半球从 20 世纪 20～70 年代，以汽油抗爆剂形式被消耗和扩散的铅已超过 500 万 t。

有机锡化合物：烷基锡有杀菌作用，用量很大。$(C_5H_5)_3SnCl$ 用作木材防霉剂。四苯基锡有稳定变压器油的作用。在船舶抗附着涂料中三丁基锡或苯基锡含量达 20%。三苯基醋

酸锡有杀菌作用，能有效防治甜菜的褐斑病。

有机砷化合物：$[(CH_3)_2As]_2O_3$（氧化二甲砷）是人工合成的第一种有机金属化合物。

人体摄入高浓度有机金属化合物，发生急性中毒症状多表现为对中枢神经系统的损害：昏迷、运动失调、语言障碍、心理状况的改变等。对人的造血系统、免疫系统及微量元素系统都会产生影响，而且是一种长时间的效应。其毒性有以下几个特点：（1）有机金属化合物有亲脂性，因此毒性比其无机母体的毒性大（有机砷例外）；（2）低级烷基金属化合物的毒性比高级的毒性大，以甲基、乙基、丙基金属化合物尤其显著；（3）完全饱和的中性有机金属化合物在失去一个有机基团后毒性变大。四烷基锡、四烷基铅在生物体内转化为三烷基锡、三烷基铅后毒性增大，原因是这类有机金属化合物既能在体液中迁移，又能溶解在脂肪中，毒作用发挥得快。

有机致癌、致突变物质。人类癌症90%左右是由环境因素引起的，这些因素有化学致癌、生物致癌、物理致癌等，其中化学致癌是主要因素。到目前为止，共调查了6000余种化学物质，其中1/6～1/4有致癌性。还有一些能引起致畸和致突变作用。水体中的致癌物质，大部分是因污染而带入的，也有在水中发生化学变化而产生的（表2－63）。

表2－63　饮水中有机致癌、致突变物质

饮水中的证据充足的有机致癌物质	六氯苯、苯并［a］芘、多氯联苯、二氯甲烷、1，2—二氯乙烷，1，2—二溴乙烷，氯乙烯、苯并［b］萤蒽，四氯甲烷，茚并芘
饮水中的有机致突变物质	乙醛、2，4D、2，4，5T，艾氏剂，3—氯苯胺，3、4—二氯苯胺，蒽，苯、溴代苯，乙烯苯、苯并［a］芘，联苯，多氯联苯等

5．生理污染

城市生活污水、医院污水、垃圾污水和污水处理厂排水中，含有细菌（如霍乱、伤寒、痢疾等）、病毒（如肠道病毒和肝炎病毒等）、原生动物、寄生蠕虫（线虫、绦虫等）等各种病原微生物。病原微生物污染的特点是量大、分布广，繁殖快，存活时间长，如大肠杆菌和肠球菌在4～6℃时（下同）能生存400昼夜（水中初始浓度为100000～1000000个/L）；痢疾菌能生存174昼夜（初始浓度为100个/L）；脊髓灰质炎病毒能生存116昼夜（初始浓度为100个/L），通常的生化污水处理及加氯消毒后，相当种类的病原微生物仍能存活，引起病源微生物污染。联合国环境署的报告指出，人类有80%的疾病与受细菌感染有关，其中60%以上是通过饮用水传播的，1/3的患者因此而丧生。任何肠道病毒都可以经水途径传播。现在已确切证明，传染性肝炎病毒可通过水途径传播。1955～1956年印度新德里甲型肝炎流行，发病近3万人。我国上海1988年因食用不洁毛蚶和饮用受污染水爆发甲型肝炎，短期内有30余万人发病。

6．环境激素污染

环境激素指外源性的、能干扰生物与人体内分泌机能的化学物质。野外调查和实验研究表明，环境激素类物质能导致生物与人体的性激素分泌量及活性下降，精子数量减少、生殖器官异常、生殖能力降低、癌症等发病率增加、后代成活率下降等。环境激素污染使生物与人类的持续生存和繁衍受到威胁，环境激素污染已成为研究的新热点。据目前研究，已经有70种化学物质显示出不同程度的雌激素活性，并被确认为环境激素类物质。主要属于烷基酚、烷基酚聚氧乙烯醚、双酚A、邻苯二甲酸盐（或酯）、多氯联苯类、农药（如有机氯农

药）、类固醇等。烷基酚聚氧乙烯醚是全球商用的重要非离子表面活性剂，主要用于洗涤剂，在环境中降解的主要中间产物为烷基酚。类固醇类物质的激素活性大大高于其他环境激素类物质，主要来源于人体和牲畜的排泄物。激素类物质在环境中难分解，易在生物体内蓄积，并通过食物链传递。

四、与生态环境及与人体健康有关的水系分布及地质特征

1．某些癌症高发区的水体的生态环境及地质特征

20世纪70年代初在我国的部分地区发现若干种癌症有地方性集中、高发病率、高死亡率的特点。随后的调查表明肝癌的高发区在江苏的启东、泰兴，广西的扶绥、隆安，广东的顺德、白沙。这些地区的肝癌死亡率不仅高于全国肝癌的平均死亡率，也高于相毗连的邻近地区（见表2－64）。我国的食道癌的高发区见表2－65。

表2－64　我国部分肝癌高发区、低发区的死亡率

地　区	广西宁明	江苏泰兴	广西扶绥	广西隆安	广东顺德	广东白沙	全国平均	广西宁明
死亡率10万人	47.76	37.86	46.87	43.85	26.84	21.60	10.0	7.47

注：广西宁明县为低发区。高发区江苏启东通兴乡死亡率50.67/10万人；毗邻的西宁乡为17.28/10万人。

表2－65　我国食道癌高发区的发病率

地　区	河北磁县	河南林县	山东阳城	四川盐亭	江苏淮安	江苏建湖	江苏泰兴
发病率/10万人	124.11	131.74	139.49	69.01	93.62	68.81	59.66

除此外，广东的汕头、梅县，安徽的巢湖，河南的信阳都是食道癌的高发区。

我国的上述癌症高发区在生态环境、地质及地球物理条件方面都有明显的特征。进一步说，地貌、岩石和土壤特征、水体及饮用水特征、水和土壤中的微量元素都对癌症的发病率有影响。

1）地貌、岩石、土壤与消化系统癌症发病率的关系

在太行山山脉中南段食道癌高发区，山区的癌症死亡率高于丘陵地区，丘陵高于平原。若推及到全国，则是山区的发病及死亡率高于丘陵地区，丘陵高于平原地区；就平原地区而论，则是水网平原地区和滨海平原区高于河流三角洲区。例如太行山南段，地貌属剥蚀型山区的林县，食道癌、胃癌的死亡率达258.60/10万人；海拔较低的广西岩溶山区的扶绥及隆安肝癌、胃癌的死亡率为48.83/10万人及48.35/10万人；苏北及长江下游水网平原地区的建湖和扬中两县食道癌、肝癌、胃癌的死亡率为68.81/10万人和59.66/10万人；在海拔最低的河流三角洲珠江入海口附近的顺德、江门、佛山三县（市）肝癌、胃癌、食道癌的死亡率分别为25.57/10万人，23.85/10万人，18.38/10万人，虽然仍属于消化道癌症的高发区，但已比山区的死亡率低了很多。在水网平原及河流三角洲，肝癌的高发区多在牛轭湖洼地、滨海沼泽或近代海退地区，如东海之滨水网末梢的江苏启东县，肝癌死亡率为60.30/10万人，而在水网平原干流地区的南通县金西乡肝癌死亡率仅9.47/10万人，接近全国平均水平。

岩石性质也对消化系统癌症发病率有影响，以广西为例，肝癌死亡率大于40/10万人的村庄多在以石灰岩为主体的峰林槽谷或孤峰平原地区。肝癌死亡率低于20/10万人的村庄则多在以砂页岩为主体的低山丘陵地区。

江苏的启东、扬中、广东的顺德，福建的莆田等肝癌高发区都与土壤类型有关。癌症高发区的土壤多为富含腐殖质的粘土、亚粘土或腐殖淤泥，而低发区或轻病区则是以沙洲或沙岗地为主的地区。

2）饮用水类型与消化系统癌症发病率的关系

消化系统癌症的高发区土壤富含腐殖质，为化学还原环境，地表水及地下水运动滞缓，水质不洁，受有机物污染严重的区域。而癌症发病率低的区域则是土壤中腐殖质不多，为氧化环境，地表水及地下水运动循环通畅，水质洁净，受有机物污染轻微的地区。癌症的发病率还与饮用水的类型关系密切。表 2－66 为江苏启东及广西扶绥各类饮用水中各种污染物含量与肝癌死亡率的关系。

表 2－66　江苏启东、广西扶绥各类饮用水及所含污染物与肝癌死亡率的关系

地　区	启　东					扶　绥		
饮用水类型	塘水	渠水	河水	浅层水	深井水	塘水	河水	深井水
COD，mg/L	4.66	3.85	3.55	3.20	1.28	48.27	0.75	0.197
腐植酸（—OH）含量，ppm	0.43	0.36	0.28	0.18	0.08	0.58	0.18	0.042
亚硝酸盐含量（NO_2），ppm	0.54	0.48	0.38	0.28	0.04	0.061	0.008	0.0096
硝酸盐含量（NO_3），ppm	14.52	18.20	21.46	67.91	1.35	0.74	0.75	0.48
肝癌死亡率，人/10 万人	65.53	58.71	41.99	5.52	0	115.05	37.94	0

注：摘引自林丰年等：中国消化系统癌症高发生态地质环境特征研究，《环境地学问题研究论文集》，石油工业出版社，1996.7.

从表 2－66 上列举的数据可见，在饮用水为塘水时、水中腐殖质及亚硝酸盐含量高时，癌症的发病率也高。

2．某些微量元素对癌症发病率的影响

近年来的某些研究结果认为，癌症高发区往往是地下水或饮用水中缺乏某些微量元素，如硒（Se）。另外，也有研究结果认为饮用水中缺乏钼（Mo）、锌（Zn）、锗（Ge）、钒（V），以及镉（Cd）、铜（Cu）过量都可能诱发癌症。但对江苏启东和广西扶绥消化系统癌症高发区饮用水中 24 种微量元素的调查表明，除了硒含量显著低外，其余元素的含量都在正常值范围内波动。1984 年以来在江苏启东还在人群中进行了补硒的试验，补硒前试验区肝癌发病率为 52.85/10 万人，在人群中通过食物补硒，在 8 年后肝癌发病率降到 14.15/10 万人。而未补硒区的人群，肝癌发病率仍维持在（50～64）/10 万人的较高水平。

还应说明癌症的发病机制还与地区经济发展水平、居民营养、饮食结构和习惯有关。

3．饮用水中某些元素的含量与地方病的关系

1）饮用水中微量氟的影响

对人体来说，饮水中含氟量的适宜区间很小，约为 0.5～1mg/L，低于此值时出现斑釉齿；高于此值时可能使人骨骼中的羟基磷灰石变成氟磷灰石并在骨骼和与之接触的软组织上，并能使血钙浓度降低，溶骨细胞活性增加，促进骨溶作用，引起氟骨症，氟化钙还会使牙冠钙化不全，牙釉受损，发生斑齿。研究表明，地方性氟病与引用水中的氟含量有关表 2－67。

表 2－67　我国若干典型氟病区饮用水中含氟量与发病率统计

地　区	饮用水中含氟量，mg/kg	病　症	发病率，%
黑龙江，肇东、安达	1.5～16	氟骨症	50
吉林，农安	1.5～9.8	斑齿	70.14
河北，阳原	1.5～17.5	氟骨症 斑齿	54.2 84.4
北京，小汤山	0.2～8.8	斑齿	99.3
河南，封丘	1.0～1.5	斑齿	33.2
山西，东茱庄	8.1	"黑牙症"	普遍发生
山东，昌潍地区	4.0～9.0	氟骨症 斑齿	99.0
陕西，大荔 定边	4.3～9.5 4～26	氟骨症 氟骨症	5.0 多发
宁夏，盐池 灵武	2.6～21.8	氟骨症 斑齿	7.7 100
天津，宜兴阜 北塘 大毕庄	2.6～4.8	斑齿 （7～16岁）	100
新疆	8	氟骨症	多发

注：资料引自陈静生等：环境地学，中国环境出版社，2001年。

除表2－67上的数据外，贵州的毕节地区、纳雍、织金等县饮用水的含氟量仅为0.05～1.02mg/L。但氟骨症或斑齿的发病率居高不下，原因不是饮用水，而是当地居民用高氟无烟煤烘烤食物（玉米）所致。目前我国环境规划已将氟列为重点污染物进行防治。

我国一些地区饮用水中含氟量高，轻的（水中氟含量约6～8ppm）会使牙齿上出现条状斑纹（氟斑牙），但还不会影响儿童骨骼的发育，重的会引起骨质疏松等氟中毒症状。但水中含氟量过低，会使龋齿的发病率增加，其证明是龋齿患者的牙釉质中氟化物含量低。水中含适量的氟（1ppm）对牙有益，但长期摄入较多量的氟（8ppm以上）会使肌腱及韧带钙化（变硬），骨骼中的骨钙被氟取代而变软、易碎，晚期还可能使脊柱僵硬，不能活动。短期摄入过量的氟可引起全身中毒，导致死亡。

2）饮用水中碘缺乏引起的疾病

某些地区饮用水或食用盐中缺乏碘，使甲状腺弥漫性肿大，少数患者还伴有甲状腺机能低下的症状（表2－68）。

还要说明，生物在生长发育过程只需要某些极微量的化学元素，这些微量的元素通常是生物体内重要的酶（由生物细胞产生的有催化作用的蛋白质）的组分。植物需要的微量元素通常是铜、硼、锌、锰、钼；动物需要的微量元素则是锰、碘、钴等。土壤或地下水中缺乏动物所需要的微量元素可能对植物并无害，但动物仅以缺乏所需微量元素的植物为食物，也可能会发生营养缺乏症。

表 2-68　某些地区饮用水中碘含量与缺碘性甲状腺肿发病率的关系

地　区	饮用水中碘含量，μg/L	甲状腺肿发病率，%
哈萨克斯坦	0~1.2	25
	0.6~3.8	12
	2.4~5.8	6
美国	0~0.5	15~30
	0.5~2.0	5~15
	1.0~9.0	1~5
	9.0~20	0~1
中国新疆，南疆	0.5~1.0	50
	2.0	30~40
	4.0	0
中国河北，东部	0.21	17.2
	0.36	7.87
	10.5	0.22
	14.57	1.44
中国陕西，眉县	1.33	37.37
	2.66	21.31
	4.15	5.23
中国，吉林	0.5~2.0	30
	2~6	15
	6~10	5
	>10	0

五、污染物在水体中的迁移与转化

污染物进入水体后，首先被大量水冲稀了浓度，随后在水环境中进行一系列复杂的物理、物理化学和生物化学的变化而改变其组成本质，这些变化往往是交织在一起的。水体中的污染物迁移转化主要包括扩散与降解两种过程。

1. 稀释和扩散

进入水体的污染物，按其本性的不同，经历的稀释与扩散途径亦各异。挥发性强的可能逸入大气空间，而使其浓度降低，如 CO_2、H_2S 等；有些密度大的则沉入水底；有些是被吸附于悬浮体上随同漂移或沉于水底。这些途径都使污染物浓度降低。然而水体中污染物受大量水流的稀释是降低其浓度的主要方式。在污染物被水流稀释的过程中，同时也有污染物自身的扩散运动。影响污染物在水中扩散的因素有：季节性的水文变化，河床的材料及结构等对水中污染物的扩散、迁移和积累均有直接作用。若水量大、流速快，污染物迁移则迅速，净化也快。但我国北方的河流在冬季、春季枯水期水量很小，污染物的迁移和转化相当慢，污染加重。尤其冬季河流封冻，冰面阻碍了水体和空气间的物质交换，水中溶解氧得不到补充。这种情况下如含有大量有机物的废水排入，则会使水中溶解氧降低，甚至消耗殆尽，致使鱼贝窒息死亡。另外，泥沙含量大的河流，对污染物的迁移和积累有特殊意义。我国北方，洪水季节河水浑浊含有大量泥沙、水中的悬浮物和胶体能吸附各种污染物。吸附后大半是共同沉入水底，或载携污染物随水迁移，这对污染物的积累和转化影响很大，对河流的净化起重要作用。山区河流常为石质河床，沉淀物较小，加上落差大，水流急，输送污染物的

能力强，不易造成污染物积累。而且水流湍急，溶解氧丰富，有利于有机物的氧化分解，流经山峡区的河段就属于这种情况。平原地区的河流流速小，污染物迁移能力弱，致使河床上常有很厚的沉积物，污染物的积累量大。有些河段，河水水位高于地下水位，河水补给地下水，污染物会随而转入地下水。在河流、湖泊和水库中普遍存在污染物在水底淤泥中累积的现象。

地面水中的氰化物，浓度下降较快，这就是由于水流的稀释与氰化物在地面水中分解的结果。氰化物在水体中浓度不超过极限值时具有自净能力。如长江某段接纳了某钢铁企业的混合废水，含氰3.5～5.35mg/L，但在排放口下游5km处，江水中氰化物的浓度达到或接近国家规定的要求。

2. 降解

降解原指有机大分子化合物分解为小分子化合物的过程，在此统称一切造成水体污染物浓度降低的化学过程。水体污染物的降解反应类型有：挥发与絮凝、水解作用、络合作用、氧化还原反应、生物化学降解、光化学反应等。

1）挥发与絮凝

任何天然水体都是上与大气层交界，下与水底地面交界的。两个交界处存在着种种形式的物质和能量交换，达成各种形式的动态平衡及平衡移动，从而改变着水中溶质的含量。

在水—空界面的平衡是蒸发与溶解的平衡。参与这个平衡的是气体和沸点低、挥发性强的液体。其来源有些直接出自污染物本身，有些则为污染物质在水中降解的产物，如CO_2、H_2S、CH_4等。大气中的正常组分N_2和O_2也同时不断参与水—空界面的溶解平衡，但不属于污染物。O_2的溶解还促进污染物的降解，使之达到无害。这是天然水体自净的主要过程。一些气体污染物和某些易气化的液体污染物（如汽油等）的挥发，可减轻水体污染。

在水—水底的液—固界面间沉淀物质的沉降与溶解是水体净化的另一重要渠道。该过程主要是水体中含有的天然胶体物质与污染物之间的吸附和解吸、溶解和絮凝沉降等反应的平衡。天然水体是多种胶体微粒共存的分散体系。水中的污染物，大多可被吸附在这些胶粒之上，随后就在这液—固界面上发生各种各样的反应过程，如溶解沉淀、络合螯合、氧化还原、离子交换、吸附解吸、生物化学降解等。实际上微量污染物（主要如重金属及农药等）在水体中的浓度和形态分布，多半取决于水体内各类胶体的物理化学行为。同时，胶体微粒作为微量污染物的载体，其絮凝沉降、扩散迁移过程等，决定污染物的去向和归宿。

水体内自然存在的胶体物质，有各类矿物（如粘土、长石等硅酸盐矿）的悬浊液和溶胶，腐殖质和蛋白质等有机高分子，铁、铝、锰、硅等水合氧化物类无机高分子，各类生物胶体（如藻类、细菌、病毒等）。这些胶体大多带有电荷，其带电状况随水的组成及pH值而变。在中性pH值附近，大部分胶体（如粘土矿物、有机胶体等）带负电荷；在酸性条件下只有少数胶体（如铁、铝的水合氧化物）带正电荷。有机高分子电解质如腐植酸、蛋白质等，其电荷是由官能团的电离产生的，电荷值也常由溶液的pH值决定。

水中胶体对污染物的作用可以分为表面吸附和离子交换吸附两大类。表面吸附是物理作用，故又称为物理吸附。这种作用是胶体巨大的表面积和表面能而产生的。离子交换吸附是因为胶体带有电荷，故决定了它具有吸附相反电荷离子的能力。胶体对各种离子的吸附为极性吸附，故为物理化学吸附。由于水中胶体大部分带负电荷，所以水体中易被吸附的是各种阳离子，因此胶体的吸附对重金属污染物的迁移起主要作用。在吸附过程中，胶体在吸附一种阳离子的同时必然要释放出等电荷数的其他阳离子，所以这种吸附又叫离子交换吸附。

各种阳离子被带负电荷的胶体吸附的被吸附能力是不同的。阳离子的交换吸附的亲和力受所带电荷数、浓度、自身的性质及环境的 pH 值等因素的影响。

腐殖质除能与金属离子螯合外，还能与其他有机物结合，并能结合在粘土矿物的表面上，因此腐殖质胶体对污染物的迁移有很大影响。当其在气候潮湿地区的酸性水中以溶胶形式存在时，它们可以吸附很多重金属离子一起迁移。研究表明，在富含腐殖质溶胶的天然水中，大部分锰、砷、锆、钼、钛、铬、钒和钍呈胶体状态迁移，铜、铅、锌、镍、钴和锡也部分呈胶体状态迁移。

胶体离子通过碰撞，相互聚集结合成为更粗的颗粒而沉降，称为胶体的凝聚或絮凝。靠各种物理化学作用，如静电力、范德华力、化学键作用力等，各种阳离子易被吸附，所以胶体吸附对重金属污染物的迁移起主要作用。

胶体粒子的凝聚依靠各种物理化学作用，如静电引力、范德华力、氢键、配位键等。当高分子物质带有电荷，且与微粒表面电荷符号相反时，高分子物质同时可发挥电性中和及粘结架桥的作用，表现出较强的絮凝功能。已经发生絮凝或凝聚的聚结团絮块，在运动中以其巨大表面吸附卷带胶体微粒，生成更大絮团，使体系失去稳定性而沉降。水中的藻类、细菌等细小生物，在水中也具有胶体性质，带有电荷，有凝聚作用。

在实际水体中，粘土矿物及其他矿物微粒、水合金属氧化物和腐殖质有机物等相互作用，形成复杂的综合絮凝体，对污染物共同发挥吸附、聚集、絮凝、沉降作用，使污染物转入底泥，从而减少水体污染物的浓度而减轻了水的污染。但底泥里的污染物与水处在动态平衡，条件变化，也可能再次转入水相。而这些累积在底泥里的污染物，处于完全不同于液相的环境，自然也会发生相应的变化，使其污染作用或有所减轻，或有所增加。

2）水解作用

水解是化合物与水的反应，该化合物上的某基团与—OH（羟基）发生交换，水解反应涉及 H_2O、H^+，因此可知 pH 是影响水解反应的重要因素。另外，温度影响电离度和化学反应速度，所以温度也是影响水解的重要因素。无机化合物主要的水解发生于盐类。在水体中值得注意的盐类水解产物是氢氧化物，具体来说是盐类的金属离子与不同数目 OH^- 的络合物。有机化合物水解，主要发生于卤代烃类、酯类和酰胺类等化合物。水体的污染物如洗涤剂、农药、动植物残骸、生活垃圾等的降解过程，多属此类有机物的水解作用。

3）络合作用

络合物广泛存在于自然界，其中心离子与配位基种类千差万别，造成形形色色的络合物。中心离子与多基配位体结合时形成螯合物，螯合物为络合物的一种。在水体中由于可作为中心离子和配位体的物种有限，所包括的络合物品种少得多。从水体污染化学的角度来看，可供为络合物中心离子的物质，主要是重金属污染物；而可以供为配位基的物质是水中的常见离子，如 OH^- 和 Cl^-，腐殖酸类物质。

大多数金属离子均能水解。金属离子与水中羟基可形成单中心离子络合物或多核羟基络合物。金属与羟基的络合物在溶解于水时会电离而存在络合平衡。若金属的羟基络合物难溶于水而生成金属氢氧化物沉淀时，则存在溶解平衡。这些平衡均受水体 pH 的支配，决定其各个组分所占比例。羟基与金属离子的螯合作用大大地提高了金属的溶解度，但同时应注意到在固定 pH 值下，此金属的氢氧化物有一溶解度的最低值（使金属氢氧化物沉淀的 pH），离开此最低值相应的 pH 的条件下，由于化合物形态的改变，溶解度也有相应的变化。

水体中金属离子还能与水体中的氯离子络合。含氯离子的络合物被认为是水体之中重金

属的较稳定的络合物。氯离子与重金属离子的络合作用可以提高难溶金属的溶解度，可使胶体重金属离子的吸附作用减弱。

水体中的有机配位体也可与重金属发生络合。水体中的有机物种类繁多，因此含金属离子的有机络合物、螯合物的种类也是很多的。不过能够在水体中达到一定浓度、多金属离子能起一定影响的螯合剂，主要是水中的腐殖质。总的规律是腐植酸把重金属离子更多地蓄积在水底底泥中，而富里酸（腐殖质中的一种成分）可把更多的重金属离子保持在水相中。腐殖质作为一种胶体，还对金属离子发生吸附作用，一般认为金属离子浓度高时，以吸附为主，在离子浓度低时，以螯合作用为主。

4）氧化还原反应

天然水体是一个复杂的氧化还原体系，其中存在多种氧化剂和还原剂，常见的氧化剂有：溶解氧、Fe（Ⅲ）、Cr（Ⅵ）、Mn（Ⅳ）、S（Ⅵ）、N（Ⅴ）、As（Ⅴ）等，常见的还原剂有：Fe（Ⅱ）、S^{2-}、大量有机物质等。大多数河流、湖泊和海洋表层水呈现较强的氧化性，而富含有机质的水体底泥和湖泊底层水呈现较强的还原性。有些金属在氧化环境中迁移能力强，如铬、钒等，在高度氧化的条件下形成易溶的化合物，如铬酸盐、钒酸盐等，加强了迁移能力。而另一些元素如铁、锰等，由于在氧化条件下形成溶解度很小的高价化合物，很难迁移。在还原条件下铬、钒等形成难溶化合物而不易迁移，但铁、锰等却形成较易溶的低价化合物，当无硫化氢存在时，有很大的迁移能力。有硫化氢存在时，一般金属多会生成难溶的硫化物沉淀，阻止这些金属的迁移转化。

5）生物化学降解

生物化学降解（简称生化降解）是靠生物作用使化学物质转化。对水体和地面上化合物的生化降解，微生物起关键作用。微生物在自然界中品种多、数量大，为了生存和增长，微生物需从其所在环境索取能源——碳及其他元素，在此过程中也把化学物质（例如酶）传递给环境。有机化合物生物化学降解的特点是化学物质经常与一组微生物结合而进行新陈代谢，最终产物是矿物质。非生化过程的产物通常与母体化合物差别不大。生物化学的代谢反应是在常温下发生的，受酶的催化作用使反应速度加快，生化反应所需的温度对非生化反应来说是难以发生或速度极慢的。

生化降解可分为下列三类：（1）初级生化降解，是把化合物的形态改变到必需的最低限度的生物化学降解；（2）最终降解。是由生化降解而产生水、二氧化碳和无机化合物；（3）优选生化降解，是把化合物的某种不良性质转化到必需的最低限度，如消除其起泡性或毒性等。优选生化降解是环境对生化降解的实际要求。

生物化学降解实质上是化学物质的酶解。凡能影响细胞生长、酶的产生和酶的功能等的环境条件都会影响生化降解速度。影响生化降解的众多因素是交织在一起的，几种主要的因素是：（1）化合物的物理、化学物质，如溶解度、挥发性、吸附性、化学结构等；（2）生物的品种，微生物的生理状态；（3）环境条件，如温度、pH、光照等；（4）水中的化合物，如溶解氧和同时存在的无机或有机化合物。近代科学研究了微生物的特性，利用它来治理水体污染。

6）光化学作用

物质在紫外光或可见光作用下所进行的化学反应称为光化学作用。因为在大气层上层有臭氧把日光中高能量的短波光吸收了，所以水体中自然发生的光化学反应是只在>290nm的波长光辐射下所发生的化学反应。光化学反应可分为直接与间接两类。一种化学物质由于

本身吸光而发生变化的称直接光化学反应。水体内某天然物由受光激发而引起另一种化合物发生变化的光化学反应，称为间接光化学反应。主要有两种情况。一是存在于水体里的天然物质（如腐殖质），将其自身受光照而产生的激发能传递给另一化合物，促使后者发生反应。另一种情况实质是氧化反应。在这种过程中，首先是日照水中天然物质使其产生自由基（R·）或单电子氧（$^1O_2$），这些产物成为氧化剂来使水体中另一种化合物氧化。

为探讨光化学反应对污染物治理的效应，用波长 254nm 紫外光照射 DDT 的已烷溶液，发现在 0.25h 内 DDT 损失 43%，1h 内损失 70%，4h 损失 97%；光化反应的主要产物是 DDE 和 DDD。

3．水体中氰的迁移变化

氰泛指水体中一切氰化物，如氢氰酸、氰离子和各种有机或无机的氰化物或氰络合物。氰离子 CN^- 能与几乎所有的重金属形成有毒或剧毒的络合物，但相对较重金属污染物易在水中被降解而消除，不会发生积累性转移。天然水体中的氰化物在自然条件下，会发生一系列的物理化学和生物化学变化，很多氰化物最后转化为可溶性的氰化物，如氰化氢。

氰化物在水体中的转化受水环境条件件的影响，主要影响因素是水中的氧和二氧化碳含量、水中溶有的盐类、光照情况、水温及水体中的微生物活动等。氰化物在水体中最重要的转化是分解反应，在分解过程中，氰化物首先与溶于水的二氧化碳作用，生成氢氰酸而挥发。在一般水质及 pH 条件下，这种净化占水体中氰化物总自净量的 90%左右。

氰化物还能被水中的溶解氧氧化，生成铵离子和碳酸根离子。铵离子在水中会被进一步氧化为亚硝酸盐，但亚硝酸盐在很长一段时间里不会再被氧化，因而在水中保持一定的含量，成为另一种污染物。研究表明，氰化物在水体中的氧化过程是生物化学氧化，氧化过程受日光照射和水流速度的的影响。阳光强烈、水温较高、水流急速时，分解速度加快。而光照不足、水温较低、水流缓慢时，分解速度较慢。

各种金属离子的氰络合物在水体中显示不同的性质。锌氰络合离子在水溶液中很不稳定，易于分解出游离的氰离子。铜氰络离子非常稳定，在微生物进行生化氧化时，铜离子能显著阻滞其氧化作用。只有当铜被转化为碱式碳酸盐时，氰化物才能被氧化。因铜氰化合物的毒性很大，分解速度又极其缓慢，所以这种废水必须经过妥善处理方可排放。

4．水体中重金属污染物的迁移变化

重金属污染物在水体中的迁移转化，是指其在水中位置的移动和存在形式的转化，以及由此引起的富集和分散。按物质运动形式分为机械迁移、物理—化学的迁移转化、生物的迁移转化三种基本类型。

重金属大多有变价的特性，属于不同价态的同种金属毒性不同，如六价铬的毒性最大；三价砷的毒性最大。同种价态的不同化合物毒性也不相同，如 $HgCl_2$、HgO、$(CH_3)Hg^+$ 中以甲基汞的毒性为最大。一般说来，游离的金属离子对水生生物毒性最大。而强络合的金属或与胶粒结合的金属毒性要小得多。因此仅从水体中所含某金属的总浓度，很难判断其毒性大小。

1953 年和 1964 年日本水俣市和新泻市相继发生水俣病以来，开始重视并认识汞在水体中产生的毒害。1959 年，研究证实水俣病的致病因素是来源于鱼体中的甲基汞，后来又认识到汞害的另一种新形式：无机汞在自然环境中转化为毒性远较无机汞为强的烷基汞，并可富集于鱼体中，通过食物链使人致病。

单质汞以其挥发性强、毒性大而成为自然环境各圈层的主要污染物。汞的化合物毒性也

很大，水体中无机汞化合物有 Hg_2Cl_2、$HgCl_2$、HgO 等。因为多不易溶解（$HgCl_2$ 易溶），进入生物体组织内较少。水体内有机汞化合物有甲基汞 CH_3Hg^+、$(CH_3)_2Hg$、$C_6H_5Hg^+$ 等，在脂肪中的溶解度比在水中高百倍，故易积累在生物体中，造成有机汞的危害性超过无机汞。

在工业废水中的单质汞、一价汞、二价汞化合物排入水体后，大部分被吸附在胶粒上，通过胶体的聚沉作用，沉淀于水底。水体中的胶体吸附剂以腐植酸对各类汞化合物的吸附力最强，所以淡水中 90%以上的汞是以腐植酸汞为代表的有机结合态的形式存在。由于吸附作用决定了汞在天然水的水相中含量极低，由各排污源排放的汞主要富集在排污口附近的底泥和悬浮物中。虽然在水相中汞含量极低，但也不能排除汞的污染，因存在于底泥和悬浮物中的汞还有迁移—解吸等变化。汞的迁移—转化经历的主要过程有络合反应、水解反应（pH<2 时不水解，pH 在 5～9 范围内汞和有机汞离子几乎全部水解）、氧化还原、甲基化反应。

水中的甲基汞受到阳光照射可发生光分解反应，而沉积物中的甲基汞就不可能发生分解。河流中的甲基汞都吸附在悬浮物上或沉积物中，光分解反应不重要。甲基汞的光分解反应主要发生在大气层中。甲基汞在大气层、水层、沉积物、水生生物之间发生迁移和转化。在水相中，汞以 Hg^{2+}、$Hg(OH)_{2-n}$、CH_3Hg^+、$CH_3Hg(OH)$、CH_3HgCl、$C_6H_5Hg^+$ 为主要形态。在固相中，以 Hg^{2+}、Hg、HgO、HgS、$(CH_3Hg)_2S$ 为主要形态。在生物相中，以 Hg^{2+}、CH_3Hg^+、CH_3HgCH_3 为主要形态。并随环境条件的变化而改变，其迁移过程包括以下几个方面：(1) 水中汞的气态迁移。元素 Hg 是环境空气中汞存在的主要化学形态，极易通过长距离的大气传输形成全球性的汞污染，是最难控制的污染之一。溶解在水中的汞约有 1%～10%挥发转入大气中；(2) 水中汞的水迁移。由于水体中的悬浮物和底泥对汞有强烈的吸附作用，使得水体中沉积物、底泥中的 Hg 浓度很高。许多调查表明，在直接受汞污染的水体中，即使底泥汞已达几百、几千 ppm 的含量，但在水中的含汞量仍然很低，仅有几个 ppb，甚至更少。(3) 汞的生物迁移。数量有限，危害性大，剧毒的甲基汞，有亲脂能力。

5. 水体中有机污染物的迁移变化

水体中的有机污染物可以通过水中微生物的生物氧化和溶解氧的化学氧化分解达到水体污染物的降解和净化，这两种过程都要消耗溶解氧，因此一直用水中溶解氧含量变化（BOD、COD、TOD），来衡量水体中有机物总量的多寡。

1) 无毒有机物的迁移转化

无毒有机物指糖类、蛋白质、脂肪、纤维素等（包括动植物残骸）。这类物质本身无毒，但它们在水中容易发生降解，消耗大量溶解氧，并可能产生大量氨氮、硝态氮、磷酸盐等营养物质，使水体出现严重缺氧状态和营养化。这时水草繁生，鱼虾窒息而死。

有些有机物在微生物作用下被逐渐降解为低分子物质：如糖类、氨基酸、脂肪酸和甘油等。在好氧条件下可进一步分解为二氧化碳、水和无机盐类，使有机物消除，这属于水体的自净过程。若溶解氧不足，如在水体的下层或底泥中，有机物会转化为还原性气体，如氢、甲烷、硫化氢和氨等恶臭气体，这就引起水质恶化。

2) 酚类的迁移转化

水体中的酚类会发生一系列的生物化学氧化和化学氧化等反应，最后被降解为简单的化合物。生物化学氧化是水体中酚类降解的主要途径。其过程是酚类在微生物分泌的特种酶作

用下，经历复杂的变化最后氧化为简单的化合物（如 CO_2 和 H_2O），可以导致酚类彻底消除，故现在广泛采用的生物氧化法治理含酚废水。

酚类的起始浓度影响其在水体中的分解速度。在有利于微生物活动的条件下，在一定浓度范围内，挥发酚随着起始浓度的增加而有利于酚的分解。水体中酚浓度超过一定范围，酚浓度的增加会导致分解速度下降。这是由于高浓度的酚能抑制和杀害水体中的微生物，同时水体中高浓度的酚本身也会消耗大量的溶解氧，从而减慢酚的转化过程。对于非挥发酚来说，随着起始浓度的增加，其分解速度明显下降。例如使萘酚在 25℃ 时分解，若起始浓度为 1mg/L，β 萘酚经 13 昼夜、α 萘酚经 17 昼夜就能完全被分解；当两种酚的浓度都增加到 5mg/L 时，在同样的温度和时间内，两种酚都只分解掉 60%。含有高浓度其他污染物的水体，可能影响了水内中微生物的生活条件，随即也影响酚类的分解速度。所以从工矿排出的高浓度含酚废水，须先经过预处理使其中的非酚类污染物和酚类的浓度降到一定范围，再排放到天然水体中，才能充分利用水体的自净能力将污水净化。

温度也影响酚类的生物氧化分解速度。在 0～30℃ 范围内，挥发性酚和非挥发性酚的分解速度都随水温提高而加快，苯二酚对水温变化最敏感。实验发现，酚类最适宜的生物化学分解温度是 15～25℃，水温低于 10℃，会降低微生物活性。

酚类的化学氧化进行非常缓慢，因为 O_2 并不能直接发挥氧化作用，而是 O_2 经日光照射或紫外线的作用产生出活化氧分子，由活化氧分子使酚氧化。

天然水体对酚的净化能力比较强，尤其对挥发酚，它易于氧化分解。室内实验表明，玻璃槽中水的含酚量是 1mg/L，在 20～25℃，放置 24h 可全部挥发氧化。

3）农药的迁移转化

农药的种类有有机氯农药、有机磷农药、有机汞农药、有机砷农药、氨基甲酸酯农药、苯酰胺类农药、氨基酸农药、生物农药等。

有机氯农药是含氯的有机化合物，大部分为含一个或几个苯环的氯素衍生物，最重要的品种是滴滴涕、六六六、艾氏剂、狄氏剂、氯丹等，挥发性不高，化学性质稳定，不易溶于水，易溶于脂肪。滴滴涕在水中溶解度为 0.002mg/L，在脂肪中的达 100g/kg，相差 5000 倍。表 2－69 是有机氯农药在河水中的残留量与时间的关系，表 2－70 是有机氯农药在土壤消失的时间。

表 2－69　有机氯农药在河水中的持久性

有机氯农药	残留百分率，%				
	开始	1 周	2 周	4 周	8 周
六六六	100	100	100	100	100
滴滴涕	100	100	100	100	100
艾氏剂	100	100	80	40	20
狄氏剂	100	100	100	100	100
氯丹	100	90	85	85	85

表 2－70　有机氯农药在土壤中的消失时间

农　药	艾氏剂	六六六	狄氏剂	滴滴涕
消失时间，a（年）	3	6.5	8	10

有机磷农药的化学结构为：C—P、C—O—P、C—N—P等。品名有：敌百虫、敌敌畏、毒虫畏、久效磷等。在环境中不稳定，易与水发生反应而分解，易在氧化剂作用或生物酶催化作用下发生氧化，受热易分解。因此它的残留性小，不易在生物体内蓄积。但近年来研究指出，有机磷农药具有烷基化作用，可能会引起动物致癌致突变作用，并有抗药性。表2－71是有机磷农药在河水中不同时间的残留量。

表2－71　有机磷农药在河水中的持久性

农　药	残留百分率，%			
	1周	2周	3周	4周
马拉硫磷	25	10	0	0
三硫磷	25	10	0	0
甲基对硫磷	25	10	0	0
倍硫磷	50	10	0	0
双硫磷	50	30	<5	0
乙硫磷	90	75	50	50
乐果	100	85	75	50
久效磷	100	100	100	100

其他农药如氨基甲酸酯等，化学性质不稳定，暴露在大气中易受到日光照射或氧化分解，易溶于水中。在土壤和生物体内因多种因素作用而降解，危害仅局限于生产车间、使用地区及周围局部地区（表2－72）。

表2－72　各种农药在土壤中残留时间

残留时间	含铅、砷、铜、汞农药	有机氯农药	有机磷农药	氨基甲酸酯农药
半衰期	10～30年	2～4年	1～10周	1～5周

农药在环境中的降解包括化学降解，其中非催化反应的降解作用有：水解、氧化、异构化、离子化等，水解和氧化最重要。有机磷农药易发生水解。催化反应的降解作用包括环境中的酸或碱催化降解。另外还有光化学降解作用如氧化、异构化、取代作用等。生物化学微生物降解作用有脱卤、脱烃、水解、氧化、还原、环裂解、缩合等作用。农药降解前后都可能产生有毒物质。

第五节　陆地表面的生态环境问题

陆地表面是人类居住的主要区域，是地球上生物圈的重要部分，陆地表面的生态环境问题是生物圈的生态环境问题的重要方面，包括土地荒漠化（或称沙漠化）及水土流失，森林植被，保护生物多样性以及土壤污染等问题。

一、土地荒漠化问题

1．土地荒漠化问题的提出

荒漠化是全球性重大环境问题，荒漠化直接威胁人类社会生存和发展的基础，有人将荒漠化称为"地球的癌症"。1949年法国科学家奥布立维尔在研究非洲撒哈拉以南撒赫尔地区

的生态问题时，发现该区的热带森林被砍伐和火烧后，其界限退后60～400km，出现了由热带森林演变为热带草原，又由热带草原演变为类似荒漠的景观。奥布立维尔将这种环境退化过程称为"荒漠化"。荒漠，按其地表的物质成分可分为岩漠、砾漠、沙漠、泥漠和盐渍漠。实际上，荒漠化是指由于气候变化和人类活动造成的干旱、半干旱、亚湿润干旱地区的土地退化，表现为植被的荒漠化、草场退化、土壤干旱、旱地农作物生长能力减退、土壤盐渍化、水土流失、沙漠化等，其结果是荒漠化的土地上，粮食、牧草减产乃至绝收。对森林的过量砍伐，对草场的过量放牧，盲目开荒、对水资源、土地资源和其他资源利用不合理，都会加快地球上陆地的荒漠化进程。

2. 全球荒漠化的概况和发展

现在全球有100多个国家的近10亿人口是荒漠化的受害者，其中1.35亿人有在短期内失去土地的危险。全球荒漠化土地面积达3600多万 km^2，占全球陆地面积的1/4，荒漠化的区域主要在北纬10°～55°的区域内，即从北非的撒哈拉向东北延伸，经西亚的阿拉伯半岛、伊朗、印度北部、中亚到中国的西北部及蒙古，形成一个长达1.3万km的干旱荒漠带。此外，全球还有相当多的（36亿 hm^2，折3600万 km^2）耕地和草场受到荒漠化的威胁，每年因土地荒漠化的经济损失约420亿美元。表2－73为全球荒漠化情况。

表2－73　全球旱地荒漠化情况

区域或国家	旱地面积，万 km^2	荒漠化面积，万 km^2	荒漠化面积的比例，%
中国	331.7	262.2	79
印度	255.1	107.4	42
亚洲	1671.8	1400	84
非洲	1286	1000	78
南美洲	516	79.1	15
北美洲	732.4	79.5	11
欧洲	299.7	99.4	33
澳洲	663.3	87.5	13
全球	5169.2	3618.4	70

注：资料来源：国家林业局。

20世纪60年代中期至70年代，非洲撒哈拉沙漠以南的撒赫尔地区荒漠化更加严重，长期干旱使大批灾民逃离家园，给邻近国家造成严重的难民问题。1977年8月，在肯尼亚内罗毕召开了联合国荒漠化问题会议，产生了一项为防治荒漠化的全球共同行动方案。1992年联合国环境与发展大会上，防治荒漠化被列为国际社会优先采取行动的领域。

3. 我国的土地荒漠化问题

我国是世界是荒漠化最严重的国家之一，现有荒漠化土地262.2万 km^2（39.3亿亩），占国土陆地面积的27.3%，遍及18个省、市的481个县、旗，每年净扩展荒漠化面积超过1000万亩（表2－74）。其中，草地退化面积1.05237亿 hm^2（105.237万 km^2），耕地退化面积772.6万 hm^2（7.726万 km^2），林地退化面积10万 hm^2（1000km^2）。荒漠化土地面积还以每年2460km^2 的速率在增加，相当于每年损失一个中等县的土地面积，每年因土地荒漠化而损失的粮食产量约300万t，每年经济损失540亿元（另有资料表明中国每年因土地荒漠化的经济损失约65亿美元，占全球每年荒漠化经济损失的15%）。

表 2-74 我国的主要沙漠、沙地

沙漠名称	面积，万 km^2	沙地名称	面积，km^2
塔克拉玛干沙漠	33.76	浑善达克沙地	2.38
古尔班通古特沙漠	4.88	科尔沁沙地	5.06
库姆达格沙漠	1.95	毛乌素沙地	3.21
柴达木沙漠	3.49	呼伦贝尔沙地	1.00
巴丹吉林沙漠	4.43		
腾格里沙漠	4.27		
乌兰布和沙漠	1.15		
库布奇沙漠	1.86		
累计	55.79		11.65

注：资料引自 2001 年 6 月 15 日，人民日报。

新中国建国初期，就开始进行土地荒漠化的治理，但由于人口压力和不尽合理的经济活动，我国土地荒漠化问题的整体情况是：点上治理，面上破坏；局部好转，总体恶化。20 世纪 50 年代至 70 年代中期，荒漠化土地每年平均增加 1560km^2，20 世纪 70～80 年代扩展为每年增加 2100km^2，年均增长率为 1.47%，20 世纪 90 年代以来，荒漠化土地每年增加 2460km^2，目前全国半荒漠化的沙化土地面积已达 170 万 km^2，占国土面积的 18%。

我国土地荒漠化的原因是：

（1）耕地开发过度。在粮食单位面积产量较低的生产条件下，为单纯追求粮食产量的增加，在干旱、半干旱、半湿润地区，在没有防护措施（防风林带建设、水土保持设施）和垦殖条件不完善的情况下开垦荒地。在我国的主要农业区，这类开荒规模虽然不大，但量大、面广。另一类是有组织的面积大、范围广的垦荒。据内蒙古、新疆、青海、黑龙江等 10 个省区的不完全统计，20 世纪最后 20 年，草地被开垦为农田的面积为 6.8 万 km^2，其中大多数是适宜放牧的草地或收割牧草的草场。20 世纪 50～70 年代，我国西北部发生过三次大规模的开荒，开垦草地 6.67 万 km^2。开垦为农田的草原地区，降水量稀少而且不稳定，风季、干旱季节与植物落叶、无叶期同时。由于土壤中沙质含量高，一遇大风，多有沙尘暴。这一区域从内蒙古北边的呼伦贝尔到科尔沁、浑善达克、毛乌素，一直到青海的共和，已成为我国北方沙尘暴的主要源区。还要说明，这些新开垦的地区，一般的都是耕作粗放、广种薄收。如内蒙古乌兰察布盟的后山地区，人均耕地 0.53～0.87hm^2，是全国人均耕地面积（0.106hm^2）的 5～8 倍，每个劳动力的耕作面积达 2～3hm^2，但平均单位面积产量低，平均亩产仅为 50kg 左右。

（2）放牧过分。放牧超过天然草场的承载能力，使牧草变稀变矮，草场的牧草产量下降。由于牲畜的过度践踏草地，土壤结构破坏，容易风蚀沙化。新中国建国以来，牧区牲畜从 2000 万头发展到目前的 9000 万头，但草原面积却减少了 667 万 hm^2（6.67 万 km^2），因此不可避免的发生草原牧场超载。目前我国牧区草场牲畜超载率一般达 50%～120%。严重的甚至超载 300%以上。如陕西、山西和内蒙古交界处的牧区，牲畜超载率为 170%，其中准格尔旗地区超载率达 331%。据统计，我国总面积为 317 万 km^2 的草原中，近 1/3 的面积（105 万 km^2）已经发生不同程度的退化。由于放牧过分，内蒙古大草原的牧草平均高度从 20 世纪 70 年代的 70cm 降低为 21 世纪初的 25cm，“风吹草低见牛羊”的景观已不再现。

（3）土地植被大量被用于做燃料。我国荒漠化地区一般都缺乏燃料（能源），由于交通和资金的原因，煤炭难以普遍应用，牧区主要以牲畜粪便和天然植被作为燃料，这会使草原退化进程加快。据统计，我国干旱半干旱地区（主要是牧区）有薪材林 2470km²、每年能提供 594 万 kg 燃料，仅为实际需求量 4189 万 kg 的 14.2%，缺口部分大部分由天然植被提供，若完全来自草原，每年要破坏草原 23.6 万 km²。据内蒙古的伊克昭盟统计，全盟每年砍伐沙蒿、沙柳 5 亿 kg 以上，从 20 世纪 60～80 年代，由于将草原的天然植被用于做燃料，使草原退化面积达 2000km² 以上。

（4）滥采草原经济作物。部分农牧民为了增加收入滥挖滥采草原经济作物，如甘草、肉苁蓉等药材和发菜等。由于这种掠夺性的开采，使草原破坏严重。据专家估计，每挖 10kg 甘草，要破坏 5.3～7.3hm² 草地。甘肃省 1994 年因挖甘草破坏草场 666.7km²，畜牧业因此损失 1000 万元以上。内蒙古在 1993～1996 年因采发菜，使 12.7 万 km² 的草原遭到破坏，其中约 4000km² 因严重沙化，失掉利用价值。

4．沙尘暴问题

与土地荒漠化同步的是沙尘天气。沙尘天气分为扬沙、浮尘和沙尘暴三类（表 2－75）。

表 2－75　扬沙、浮尘、沙尘暴天气的特征

天气特征	浮　尘	扬　沙	沙尘暴②
空气中悬浮物来源	远处强风吹来	本地风扬起	强风吹来
风速，m/s		6～9	>10
地面空气含沙量①，kg/m³	0.356	1.206	3.955
能见度，km	1～10	1～10	<1

①地面空气的背景值为 0.083kg/m³。

②风速>20m/s，能见度<200m 的称为强沙尘暴；风速>25m，能见度<50m 的称为特强沙尘暴。

沙尘天气在中国古代被称为“霾”（《诗经，邶风，终风》：“终风且霾”），其中“干霾”指扬沙和浮尘天气：大气中悬浮大量沙尘，呈微黄色或橘红色的浑浊状态，出现沙尘暴时，空气中悬浮颗粒物的总量中，沙尘占 40%～60%以上。形成沙尘暴的主要条件是：有能吹起沙尘的大风（气象条件），地面有干燥疏松的沙尘（地面条件）。沙尘暴通常发生在干旱地区。世界上旱地面积占 40%左右，其分布状况见图 2－6（黄色区域）。

近年来我国北方发生沙尘天气和沙尘暴的次数增加，成为重要的生态环境问题。其原因是，目前我国沙化土地面积已达 170 万 km²，占国土面积的 18%，其分布区域，西起塔里木盆地，经过河西走廊、陕、晋、内蒙，向东延伸到松嫩平原的西边，是一条长约 4500km，宽约 600km 的沙尘暴物源区。其中内蒙古高原的东南部阿拉善地区位于北京的上风口，而且又地势平坦，土壤疏松，天气干燥，风速高，是北京的主要沙尘暴源区。几十年来，由于草场大量被开垦为农田，原来的草原植被破坏，再加上水资源开发不够合理，致使生态退化，这是近年来北京沙尘暴多发的主要原因。

沙尘暴发生时，大部分风沙的航程达 200～400km，沙尘延续高度一般可达 1000～2500m，最高可达 2500～3200m。沙尘暴不但在形成的地区造成地表的严重风蚀，而且在降尘区造成空气和建筑物的严重污染。严重的沙尘暴还影响公路、铁路和航空运输，并可能造成人畜伤亡、建筑物损坏。

20 世纪 30 年代，美国大萧条时期，在西南部大平原地区发生了严重的沙尘暴，造成了

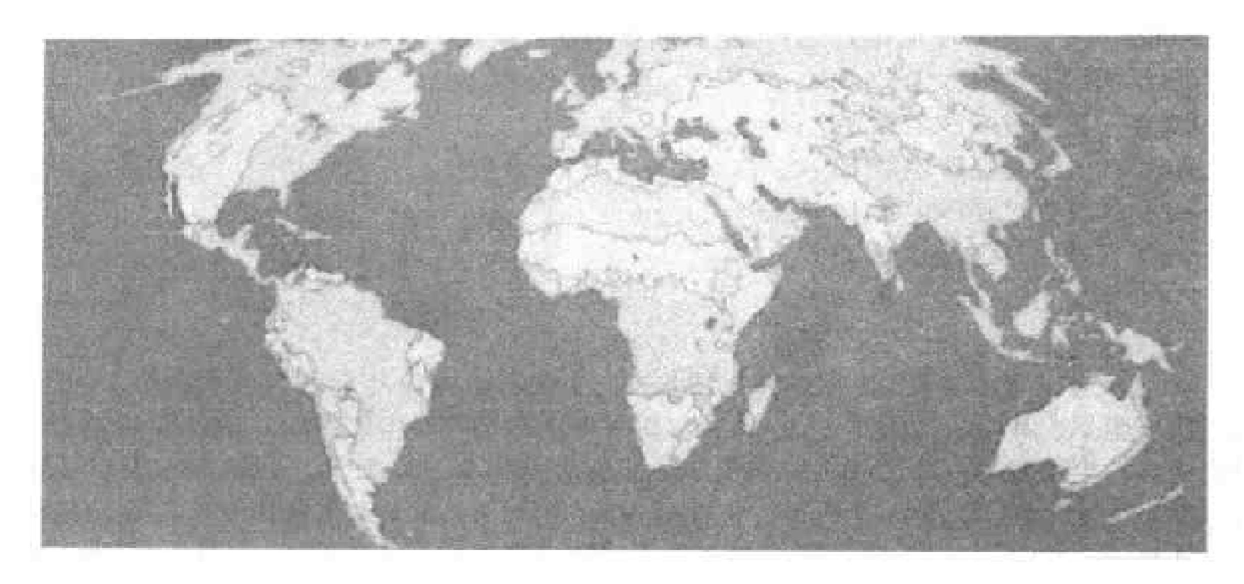


图 2－6 世界上旱地分布状况（影线区域表示旱地）
（资料来源：国家气候中心网站 http://ncc.cma.gov.cn）

南部平原到加利福尼亚的人口大迁移。这场严重的沙尘暴与长期的气候干旱和土地的滥用有关。1930～1931 年，1934 年，1936 年，1939～1940 年连续发生了严重干旱，其中 1934 年 7 月美国 2/3 的范围经历了极度干旱，使生态系统受到严重破坏。这种干旱和沙尘暴的自然现象持续了近 10 年，使得数百万倾农田被毁，几十万人背井离乡。图 2－7 是美国 20 世纪 30 年代沙尘暴的情形。



图 2－7 美国 20 世纪 30 年代沙尘暴的情形
（资料来源：国家气候中心网站 http://ncc.cma.gov.cn）

2000 年 4 月 6 日北京发生近年最大的一次沙尘暴，当时最大风速 14m/s，能见度 500m，地面空气中含沙量 $1kg/m^3$，为一般沙尘暴。1993 年 5 月 5 日，甘肃省金川市发生强沙尘暴，最大风速 34m/s，能见度 0m，地面空气含沙量 $1017kg/m^3$！午后，伸手不见五指，造成重大损失，属严重灾害性天气。

由于自然条件改变（年平均气温升高和干旱）和以往对西北部经济开发的失误（过分强

调“以粮为纲”，使草原退化），20世纪后期我国发生强沙尘暴的次数翻了两番：

50年代发生过强沙尘暴5次；

60年代发生过强沙尘暴8次；

70年代发生过强沙尘暴13次；

80年代发生过强沙尘暴14次；

90年代发生过强沙尘暴23次；

2000年发生过强沙尘暴28次；

2001年发生扬沙和沙尘暴32次。

沙尘暴这种灾害性天气现象，在我国北方发生普遍：1979年新疆塔里木盆地4～6月发生三次沙尘暴，其中一次历时三d，尉犁县每平方千米平均降尘25600t。1983年新疆石河子垦区受强沙尘暴袭击，25万亩农作物受灾，直接经济损失300万元。1993年5月，我国西北部发生强沙尘暴，死亡380人，牲畜死亡失踪12万头，505万亩农田受灾，直接经济损失5.4亿元。1995年5月15日，甘肃省发生强沙尘暴，降尘量达1243.1万t，相当于省内最大水泥厂15年的产量。1998年西北12个地州受强沙尘暴袭击，使156万人受灾，牲畜死亡11.09万头，受灾农田46.1万亩，直接经济损失8亿元。据林业部门统计，我国近年来源于西北的沙尘暴造成的经济损失，每年约540亿元，约是1998年甘肃、宁夏、内蒙古三省区农、林、牧、鱼产业国内生产总值598亿元的91%。

除了荒漠化问题外，我国水土流失已经相当严重。《中国大百科全书，水利卷》将水土流失定义为：在水力、风力重力等外力作用下，水土资源和土地生产力的破坏和损失。包括土地表层侵蚀及水的损失也称为“水土损失”，在我国，水土流失也称为土壤侵蚀。

我国是世界上水土流失严重的国家之一。全国水土流失面积367万km^2，占国土总面积的38.2%。根据20世纪80年代末期遥感调查，全国轻度以上水力侵蚀面积179万km^2，轻度以上风力侵蚀面积188km^2。水力侵蚀主要分布在山区、丘陵区，风力侵蚀主要分布在“三北”地区和长城内外、黄泛平原和滨海地区。此外，在高寒山区还有冻融侵蚀区125万km^2。水土流失在长江、黄河、海河、淮河、松花江、辽河、珠江七大河流域和太湖流域都有分布。其中长江流域1957年水土流失面积为36.38万km^2，占流域面积的20.2%，到20世纪90年代，全流域水土流失面积已达56.9万km^2，占流域面积的31.5%。90年代长江每年流经三峡的泥沙量已达7.2亿t。黄河流域水土流失面积为46万km^2，松花江和辽河流域28万km^2，海河流域12万km^2，全国除上海外31个省、市区都有水土流失的分布。其中新疆、内蒙古水土流失面积占全国水土流失面积的47.7%，甘肃、青海、四川、云南、黑龙江、西藏、山西等七省区水土流失面积占全国的29.6%。水土流失面积占本省区总面积50%以上的有6个省区（山西、内蒙古、陕西、甘肃、新疆、宁夏），水土流失面积占省区总面积30%～50%的有9个省区（北京、河北、辽宁、山东、河南、湖北、四川、贵州、云南）。截止到1996年底，全国共治理水土流失面积70万km^2，占全国水土流失面积的19.1%，目前年综合治理面积3.5万km^2，年综合治理进度0.9%。

二、森林植被问题

1. 人类对森林资源开发的历程

人类对森林的认识，最初是将其视为一种一次性的资源，如为人类生活提供薪材，甚至食物。除了常规的锯材、木质人造板、纸浆等用途外，随着生产的发展和进步，林产品在经济发展中的作用和应用领域越来越广泛，例如巴西的森林木材为钢铁工业提供木炭；许多热

带国家用木材作为制茶、制陶和石灰生产的薪材；采矿和铁路建设所用的坑木和枕木；制成品的木质包装等。据1995年联合国粮农组织统计，在全世界范围内，一次性的林业产品的价值占世界各国国内生产总值（GDP）的2%，林产品的贸易占国际商品贸易总值的3%。全世界有24个国家（主要是亚洲及非洲国家）的林业产品价值占其国内生产总值的10%以上，其中有4个国家的林业产品总值占其国内生产总值的20%以上（乌干达：23%；不丹：22%；扎伊尔：21%；斯威士兰：20%）；全世界有19个国家林产品贸易占其贸易总值的10%以上，其中有5国占35%以上（柬埔寨：43%；所罗门群岛：42%；赤道几内亚：42%；芬兰：36%；缅甸：35%）。

此后，人类认识到森林还有比较间接的资源价值，即以原始森林自然景观和野生动物资源为依托的旅游业。原始森林覆盖的地区，有大面积的绿荫和宜人的气候，如非洲的肯尼亚、津巴布韦、博茨瓦纳和纳米比亚。中国近年来也将湖北的神农架、湖南的张家界、四川的九寨沟等有较大原始森林的区域列为旅游资源区域，并予于重点保护。

其实，森林对人类社会的重要贡献是在生态环境方面，其作用是多方面的：保护水土资源；保护生物的多样性；为农业可持续发展提供支持；吸收 CO_2（$1hm^2$ 阔叶林1昼夜能吸收1t CO_2，放出730kg O_2，可供约1000个人呼吸的需要——成年每天要吸人约0.76kg O_2，呼出约1kg CO_2），并对全球气候变暖进行调节；在城市可降低城市噪声；在干旱及半干旱地区防止土地荒漠化和资源退化；保护沿海地区和沿海渔业。如森林对降水的截留率高达12.6%～37.8%，比无林地可减少地表径流85.1%和土壤冲刷量58%。经概算，黑龙江省原林区（未垦殖前）涵养的水量，相当于该省现有水库总容量的9倍多。无林区20cm厚的土层只要46年便可冲刷殆尽，而有林地的土壤则需长达57万年。

还应该说明，森林，尤其是城市和城市周围的森林在防止水土流失以保障城市用水的供应、减轻空气污染、缓冲噪声等方面表现出特别意义：$1hm^2$ 森林每年可吸纳50～70t尘土，能使35%的空气得以净化，能使噪声减少26%，还可使太阳光的有害作用减少1/10～1/7。另外，可能还有调整现代社会中人的心态的功能：森林提供的绿色空间和宜人的气候，能够娱乐人的身心，能培养人注意生态环境和保护野生动植物的意识，甚至能陶冶人的情操，培养人类和自然界协调发展的观念。套用一句流行的话说是，森林在精神文明建设中有积极作用。

2. 森林资源的作用和保护

前已述及，由于人类活动使大气层中的 CO_2 含量增加。有资料表明，人类活动产生的 CO_2 中有76%来自化石燃料燃烧，23%来自热带森林的砍伐、焚烧和森林退化；其余1%来自水泥制造。因此，为防止大气层中的 CO_2 增加，从消极方面说，可减少或控制化石燃料的使用。但更积极的办法可能是保护森林植被。一方面减少森林的砍伐可减少向大气中排放的 CO_2 的总量，另一方面森林植被还可以吸收大量的 CO_2。从碳元素在自然界循环的角度来说，大气层中的 CO_2 被森林植被吸收，将其存储在森林植物中，而热带雨林的作用特别明显，每年全世界森林中积蓄的碳的80%，是在热带雨林中。据全球变化政府间小组（IPCC）的估计，通过减少森林砍伐的速度，促进森林再生，扩大植树造林面积，改善农林结合制度，能够抵消化石燃料燃烧所产生的全部 CO_2 中的12%～15%。这显然会减弱大气层的温室效应。可惜的是，20世纪最后15年，由于人类盲目砍伐，全球热带雨林面积减少了2亿 hm^2，但森林被砍伐后留下的空地并不适宜于工业和农业开发。全球的森林和植物每年能通过吸收 CO_2 还能产生约4000亿 tO_2，这对维持地球上的生态平衡作用极大。

对森林的砍伐有以下几个方面的原因：其一是粮食问题；其二是能源需求；其三是工业原料的需求。

尽管全世界的粮食供应在增加，但估计全球还有8.4亿人缺乏足够的粮食来满足基本营养需要。而增加粮食生产的主要途径是扩大耕地面积。预计从20世纪90年代中期到2010年，世界粮食产量每年可增加1.8%，为此需要每年新开垦约9000万 hm^2 土地用于粮食作物种植，其中一半以上的新垦耕地来自森林砍伐。除了直接用于农耕外，森林产品还为人们购买粮食提供必须的收入。另外，粮食烹制为食品，也要消耗一部分薪材。

据联合国粮食及农业组织1997年在《世界森林状况》中公布的资料，目前全世界还有40%的人口以薪材和木炭为主要或唯一能源（用于做饭和取暖），即全世界有约20亿人是木材燃料的使用者（按全世界有50亿人计算），而且全世界依靠木材为主要能源的人口可能在20世纪末或本世纪初增加到30亿人。这是由于世界上相当一部分人口（主要是发展中国家中的农村居民）居住在远离主要电力网络和化石燃料的生产或加工中心，即使是在电力或化石燃料供应方便的地区，也有人由于价格或习惯或其他原因（如正宗北京烤鸭要用果木作燃料）使用木材燃料。目前，20多亿的木材燃料使用者中约有一半面临燃料短缺，而已有1亿多人面临实际上的“薪材饥荒”。

3. 世界森林资源及开发状况

从1970年到1994年的25年中，全世界的木材产量从24.63亿 m^3 增加到33.58亿 m^3，即净增近9亿 m^3。近34亿 m^3 木材的消费价值超过4000亿美元。1994年木材的消费结构为：薪材和木炭，18.91亿 m^3，占56%（其中发展中国家消耗量为17亿 m^3，占当年薪材和木炭消耗量的90%）；工业用木材（包括工业用圆材、板材、用于制造人造板的材料、用于制纸浆的木材），14.67亿 m^3，占44%（其中发展中国家消耗量仅为4.17亿 m^3，占当年工业用木材量的28%）。从1970年到1994年，发展中国家的木材产量从12.06亿 m^3 增加到21.22亿 m^3，增长率为76%，在全世界木材产量中所占比例从1970年的49%上升到61%；但是薪材和木炭的用量也从9.98亿 m^3 增加到17亿 m^3，也就是说发展中国家增产的木材基本上都作为能源被烧掉了。另有资料表明，发展中国家的薪材和木炭的增长率和人口增长率十分接近。表2-76为世界及部分国家和地区的森林资源情况。

表2-76　世界各大洲和主要国家1990～1995年森林资源状况

地区或国家	1990年森林面积 1000 hm^2	1995年森林面积 1000 hm^2	1995年人均森林面积 hm^2	1995年森林覆盖率，%	1990～1995年变化率，%
非洲	538978	520237	0.7	17.7	-0.7
亚洲	490812	474172	0.1	17.7	-0.7
大洋洲	91149	90695	3.2	10.7	-0.1
欧洲	144044	145988	0.3	30.9	+0.3
北美及中美	537899	536529	1.2	25.5	-0.1
南美洲	894466	870594	2.7	49.7	-0.1
原苏联	813381	816167	2.8	37.2	+0.1
美国	209572	212515	0.8	23.2	+0.3
加拿大	243698	244571	8.3	26.5	+0.1

续表

地区或国家	1990年森林面积 1000hm²	1995年森林面积 1000hm²	1995年人均森林面积 hm²	1995年森林覆盖率，%	1990－1995年变化率，%
印度	64969	65005	0.1	21.9	0
巴西	563911	551139	3.4	65.2	－0.5
中国	133756	133323	0.1	14.3	－0.1
印度尼西亚	115213	109791	0.6	60.6	－1.0
全世界总计	3510728	3454382	0.6	26.6	0.3

注：资料来源：《世界森林状况1997》，联合国粮食及农业组织。

按1995年的资料，中国森林面积占世界第五位（前四名为：俄罗斯，巴西，加拿大，美国）；森林覆盖率在205个国家和地区中列第121位，为世界平均值的54%；人均森林面积列第122位，为世界平均值的1/6。1998年工业木材消耗量为5920万m^3（仅水泥包装用纸一项，每年就要消耗300万m^3优质木材），预计2000年工业木材消耗量将达到1.1亿m^3，而国内可供木材资源仅为6500万m^3。我国近期森林年生长量约2.6亿m^3，但砍伐量为2.94～3.4m^3。从上述资料可见，中国保护森林资源的问题十分突出。

中国在森林资源方面的另一问题是病虫害问题。由于植物保护工作滞后，20世纪90年代以来，森林病虫害面积每年约800万hm^2。仅1998年，因病虫害致死的林木为4亿多株，折合林地面积25万hm^2，相当于每年人工造林面积的6%，每年因此减少的林木生长量为700万m^3，经济损失约50亿元，超过森林火灾的损失。森林病虫害使一些风景名胜林面临威胁。五台山、黄山、普陀山都受到过森林病虫害的威胁，松树线材病的疫区离黄山的直线距离已不到70km，使著名的黄山松面临虫害威胁。

三、保护生物多样性问题

地球生物圈内约有5000万个物种，目前已被科学鉴别的不到140万种。预计今后50年内，将有100万个物种由于人类活动而灭绝，即有许多物种在还未了解其性态前就已灭绝。因此防止对生物圈的破坏，保护生物的多样性是保护生态环境的重要问题之一。

1．生物多样性的意义

生物多样性是人类生存的资源基础。人类的生命活动，即生存和繁衍都是以消耗其他生物资源为代价，人类生存除了需要阳光、空气、水以外，维持生命所需要的食物、衣服、住所主要依靠其他生物供给。在世界上众多的植物品种中，大规模种植的仅150余种；人类食物的90%由20个物种提供，其中70%由小麦、稻米、玉米三种作物提供。除作为食物以外，生物还是人类制造医药、卫生保健用品的重要资源，在这方面的应用正日益扩大。

生物多样性是人类经济活动的资源基础。人类经济活动中所需的相当一部分原料，如工业原料（木材、橡胶、松脂、香料、皮革、动植物纤维等）乃至一部分能源是由自然界的生物提供的。

生物多样性是人类科学和艺术活动的重要依存条件。动植物的生存发展和演化的规律、生物的性态是科学研究的重要内容，对生物功能的模仿和研究还是某些应用技术的先导，由对动植物功能的研究和模仿发展起来的仿生学，是现代应用科学中的重要分支。例如根据响

尾蛇的红外线定位功能研制的用红外线制导的响尾蛇导弹就是一例；一些动物还可以作为医药、航天的实验材料。观赏植物的栽培是人类艺术创造的领域之一，宠物的养殖则进入人类的感情世界。

生物多样性在生态平衡中的作用。在这方面反面例子是中国1958年以政治运动的手段大规模的捕杀麻雀，致使农田害虫危害严重。20世纪70年代美国的阿拉斯加曾经为保护驯鹿而大规模捕杀驯鹿的天敌野狼，但在野狼灭绝后，却发现驯鹿因失去天敌而种群退化。某些生物还能为人类除去一些害虫，例如一只燕子能吃掉3万多只农田害虫，相当于5个农民施用农药的效果。一只猫头鹰一个夏季能捕杀1000多只田鼠，相当于使1t谷物免于鼠害。

综上所述，保持生物多样性，能够保持和扩大人类生命活动、经济活动所需资源的基础，能维持自然界的生态平衡，因此，将保持生物多样性列为保护生态环境的重要内容。

2. 我国生物多样性的特点

生物种群丰富。中国是世界上野生动植物种类最多的国家之一，仅脊椎动物就有6260种，占世界种数的10.6%，其中陆栖脊椎动物2340种。占世界总种数的10%以上，还有100多万种无脊椎动物。中国的鸟类的种类数为1244种，占世界鸟类种类总数的13%，居世界首位，其中雁鸭类45种，占世界总种类数（166）的28%；全世界有鹤类15种，我国有9种；我国的兽类有449种，占世界兽类总种类数的11%；我国有灵长类动物16种，而在一些欧美国家则根本没有这些动物。我国的鱼类达3862种，居世界前列。我国植物区系的高等植物种类达3万余种，占世界总数的10%，仅次于马来西亚（约4.5万种）和巴西（约4万种），列世界第三。我国的药用植物11000多种，牧草4200种，观赏花卉2200种。另外，还有苔藓植物106科，占世界总数的70%；蕨类植物52科、2600种，占世界总数的80%、26%；我国有裸子植物（如银杏）11科、34属、250种，占世界总数的29.4%；被子植物占世界科、属总数的54%和24%。

生物物种的独有性高，经济价值高的品种多。我国疆域辽阔，地形、地貌、气候和土壤条件多样，形成了复杂多样的生物生长和繁衍环境。又由于第四纪冰川分布范围不大，因此保留了相当多的源于远古的生物品种，例如被称为活化石的大熊猫、白鳍豚、水杉、银杏等。此外，有经济价值的生物，如食用和药用菌类、毛皮用野生动物、药用野生动植物的种类和数量都不少。

3. 生物多样性保护的问题及现状

由于人类对农业和林业资源的开发，野生动植物的生存环境受到威胁。有专家估计，由于人类活动的影响，近代生物物种的丧失速度要比其自然灭绝速度快1000倍，比生物物种的形成速度快100万倍。生物物种的丧失速度在工业革命前约是每天1种，现在加快到约每小时1种。目前，世界上约有600种鸟、400多种兽、200多种两栖类爬行动物和2万多种高等植物濒于灭绝。某些生物物种的消失可能导致自然界的生态平衡中的某些环节被破坏，其最终结果可能不利于人类的生存。野生动物种类减少的原因之一是人类的捕杀和自然环境的恶化。例如1970年非洲共有大象250万头，由于掠夺象牙者的滥捕滥杀，到1989年只剩下35万头；同样从1960年到1996年非洲犀牛从6.8万头锐减到2408头。在中国，突出的例子是由于长江的开发，已经繁衍了2000多万年的白鳍豚已从1984年的300头左右减少到90年代末的不到100头。20世纪70年代吉林长白山还有东北虎70多只，90年代末估计仅存5～7只。20世纪90年代末，野生的华南虎在广东仅存6只（全国21个动物园还有53只），已难以维持种群延续所要求的数目，可能在50年内灭绝。20世纪50年代在相当大范

围内都有分布的朱鹮，到1981年仅在陕西汉中发现7只，近年来虽经多方设法保护（当地不使用化肥和农药），2000年末全国的朱鹮也不过有248只，全世界也仅存约300多只。中国在进入20世纪80年代末以来，由于受短期经济效益的驱使，一些地方掠夺性地捕杀野生动物，使野生动物资源受到极大破坏。例如青藏高原上的珍稀动物——藏羚羊，由于1kg藏羚羊绒市场价格高达2000多美元，一条由300～400g藏羚羊绒织成的围巾价格竟达3万美元，导致捕杀藏羚羊的案件屡禁不绝。从1990年以来仅缴获的被盗猎分子偷猎的藏羚羊皮就有17000余张。在各水域由于对鱼类的过量捕捞和污染，某些水产品已经相当稀少，如中华鲟、银鱼及近海水域中的黄鱼、对虾的产量都锐减。

根据1998年的调查结果分析，中国约有433种（占全国脊椎动物种类的7%）脊椎动物濒危；灭绝或可能灭绝的10种。我国温带地区有10%的植物处于濒危或临近濒危；热带、亚热带植物中约有4000～5000种濒危或临近濒危（占全国高等植物种类总数的15%～20%）。我国被子植物中珍稀濒危品种达1000种，极危品种28种，已灭绝或可能灭绝7种。裸子植物濒危的63种，极危的14种，已灭绝1种。

为保护某些生物，我国仿照国外的方法，建立自然保护区，到1993年为止，已有自然保护区766个，总面积6618万hm^2，为国土总面积的6.8%，2000年我国自然保护区已达到1276个，保护区总面积占国土面积的12.44%。三江平原已被列为自然保护区，其面积为3180万hm^2，为国土面积的3.31%。2000年底被批准建立的自然保护区还有155处。预计2010年我国自然保护区将达到1800个，面积将达1.55亿hm^2。我国还公布了重点保护的野生动植物名录，使257种珍稀动物和353种濒危植物被列入被保护名单。另外，还实施了15个野生动植物拯救工程，建立了一批野生动植物保存基地（15个野生动物驯养繁殖中心和32个野生动植物监测中心，13个鸟类保护站），使国家重点保护的野生动植物中的45%得到保护。但从总体上说，中国保护生物多样性工作还处在起步阶段。

四、土壤污染问题

土壤污染一直是环境科学研究的重点。日本是世界上土壤污染发现最早，也是污染严重的国家之一。但土壤污染研究是在经历土壤镉污染造成的"骨痛病"等环境事件后，于20世纪60年代以后才步入正轨。

土壤污染来源途径多，水质、农药、化肥、空气和垃圾等都能对土壤形成污染，而且，土壤被污染后不易恢复，有的耕地因为污染而永久休耕。已查明，农药中的无机化合物如砷、汞、硼、氯及有机化合物如碳氟化合物、有机磷等，都可残留在土壤中。这些有害成分会被农作物吸收，并残留在农产品中。重金属污染农田以镉和铅影响最大，这两种重金属不会对农作物生长造成影响，因此人容易误食被污染的农产品。其他几种重金属在土壤中含量过高，农作物会先受影响，枯死或空穗，这种农产品不易流到市面上。

随着工业的高速发展、化肥、农药的广泛使用、人口的增多，已有大量土壤被污染。我国只占世界7%的耕地养活22%的世界人口，保持耕地的产量部分是靠化肥和农药的大量施用。据估计，我国受农药污染的土地已达到1.3亿hm^2。留在农田里的废包装盒、碗、袋达几十万吨，据专家统计每亩土地残留塑料制品3.9kg，减产幅度为：玉米11%～13%，小麦9%～10%，水稻8%～14%，大豆5.5%～9%，蔬菜14.5%～59.2%；1995年我国年产塑料516.87万t，2000年1087.51万t，按国际经验计算，应有15%，即约100万t塑料回收，而我国物资部门仅回收了30万t，仅高发泡白色塑料包装，两年的废弃量就可覆盖新加坡全国。而且，中国的乡镇企业使得污染从城镇转移扩大到农村。大量土壤的净化功能、缓

冲功能、有机体支持功能正在丧失，作物的产量和品质也受到影响，土壤污染使我国农业粮食减产超过 1.3×10^{10}kg。

台湾有 87.4 万 hm^2 的耕地也不同程度受到污染，44.3 万 hm^2 农田中的 6.3 万 hm^2 的水质被污染（占 14%）。台湾省药物毒物试验所对台湾农田调查分析了镉、铅、锌、锰、砷、铜、镍等 8 种重金属元素，发现桃园有约 500hm^2 农地受镉污染已经永久修耕，其他还有 5 万 hm^2 农田的各种重金属含量偏高，台湾在用于农田灌溉的水质中，铬含量超过标准的高达 24%，铜达 25%，镉为 8%。有报纸报道，台湾台中的福寿山农场，收成 25 万 kg 水果，竟使用了 34 万 kg 的农药及化肥。

要控制和消除土壤污染，有下列几种途径：一是控制和消除污染源，在土地周围，大力推广无毒工艺、清洁生产，控制或消除工业"三废"排放。二是控制化学农药的使用，积极推广生物防治；国家绿色食品发展中心制定生产绿色食品的农药使用准则，只要严格按照该准则实施，就能达到既防治病虫害，又减少土壤污染之目的。三是选用高效、低毒、低残留农药取代毒性大、稳定性强的农药，严格控制使用次数和使用量，注意安全间隔期。四是提倡化肥和有机肥相结合，提高化肥利用率，生产复合肥，研制开发长效肥料。五是积极进行污染土壤的修复研究，目前开发治理方法有土壤空气抽取法、生物处理堆肥法、生物修复技术（植物修复和微生物修复）等。美国开发出一种称作动力地下剥离技术的方法利用蒸气加热土壤和地下水，分离出污染物。六是制定有关土壤的环境标准。日本环境厅根据《环境基本法》于 1991 年 8 月就镉等 10 种物质对土壤的污染设定了环境基准，近年来又对污染土壤的 15 种有机氯化合物追加了环境基准。

我国土壤污染研究经历了两个典型时期：20 世纪 70 年代主要研究以农药为主的有机物造成的土壤污染、底泥重金属污染和污灌对农田系统的影响；20 世纪 80 年代国家组织全国范围内的土壤背景值调查和环境容量研究等工作，在 29 个省、市和自治区进行了系统的研究；土壤环境容量则是区域环境规划和土地利用规划的重要参数。自从 1983 年以来，土壤环境容量就作为我国国家级项目进行了系统的研究。在土壤环境背景值和土壤环境容量工作的基础上，还对土壤环境质量基准进行了专门的研究，这些工作为我国土壤质量评价及土壤污染控制奠定了基础。我国于 1995 年颁布了《土壤环境质量标准（GB1 5618—1995)》，并于 1996 年 3 月开始实施。

第六节　城市环境地球物理及其他环境问题

一、世界和我国城市发展概况

城市的概念是："一个较永久性的和组织完好的人口集中地"，城市化则是："大量人口集中定居于较小面积内从而形成城市的过程"（《不列颠百科全书》，国际中文版，1999 年版本）。人类社会中最早的城市大约出现在 1 万年前的新石器时代，其重要特征是农业品生产足以供应一批永久性的非农业工匠。由于长期定居，人类开始使用较耐用的建筑材料（砖瓦、石材）；由于人口集中需要管理，并产生了社会分工和社会管理，出现了交通运输，同时也产生了以供应城市居民食品等重要生活资料为主要功能的农村。为了防止外来侵袭，相当多的城市还修筑了城墙，城市是人类活动中的一种重要现象，城市的出现极大的改变了地球上的自然景观，从而也改变了生态环境。

1．世界城市发展概况

约公元前3000年在美索不达米亚、印度河谷、黄河流域和尼罗河畔出现了较大的城市，有考古资料表明，公元前2000年，上述文明古国的城市人口密度曾达到49400人/km^2，远超过目前像上海、加尔各答这样人口密度为27000人/km^2的、相当拥挤的大城市。

城市的定义或概念在人类发展的各个历史时期和不同的国家是在变化着的。联合国曾经建议将人口积聚规模为2万人以上的区域定义为城市。但实际上，秘鲁和乌干达规定几百人的集聚地区就算城市，而意大利、塞内加尔则规定人口集聚数上万的区域为城市，在美国，凡居民超过2500人的地方，都称为"城市地区"。在中国习惯上将人口在5万人以上的居民区称为城市或城镇。

世界城市化的进程主要是在工业革命以后的近300年内。表2－77为1800年以来世界城市人口占当时总人口的比例。

表2－77　1800～2020年世界城市人口占总人口的比例

年　代	1800年	1850年	1950年	1980年	2000年	2020年
城市人口所占比例	0.03	0.07	0.32	0.4	约0.48（发达国家0.76，发展中国家0.41）	0.57（发达国家0.81，发展中国家0.52）

注：据联合国人口处提供的资料；1800年及1850年的城市人口分别为2千人及5千人以上的集聚区。

预计到2020年，全世界人口将达到76.75亿人，其中城市人口占56%，发展中国家的城市化进程将会加快，其城市人口总数将从2000年的近20亿人增加到约33.5亿人（发达国家则是从2000年的9.03亿人增加到2020年的9.91亿人）。

2．我国城市发展概况

据2001年4月公布的第五次全国人口普查基本数据，全国人口12.9535亿人，其中城镇人口4.5594亿人，占35.19%。据联合国人口处提供的资料，我国1980～2020年城市人口及占人口总数的比例见表2－78。表2－79为我国近50年来城市数目的增加的情况。

表2－78　1980～2020年我国城市人口及占人口总数的比例

年　份	城市人口，亿人	城市人口所占比例，%
1980	1.95	0.20
2000	4.38	0.34
2020	7.11	0.49

注：资料引自《世界资源报告：1998～1999年》，中国环境科学出版社，1999年；该资料中预测的2000年中国城市人口占总人口的比例（0.34）与2001年4月公布的全国人口普查基本数据中公布的数值（0.3519）接近，

表2－79　新中国建立以来城市数目的演变

1949年	1964年	1981年	1988年	1990年	1993年	2000年
136	167	299	432	467	570	600

注：资料引自为扑等：《资源·环境·地球》，重庆大学出版社，1999年，

另有资料表明，到2010年，我国城市将达到1000座，城市人口比例达50%。

联合国人口处提供的资料还认为，1995 年，我国人口在 75 万人以上的城市占城市总数的 12%，到 2015 年，将增加到 17%。

按城市居民的人均居住面积、住宅通水、通下水道、通电和人均用水量等指标与国外某些城市相比，我国城市的发展水平不算高。表 2－80 是我国和部分外国城市居民的生活环境水平比较。

表 2－80　我国和部分外国城市居民的生活环境水平比较

城　　市	人均居住面积，m^2	人均日用水量，L	住宅通水的比例	住宅有下水道的比例	住宅通电的比例	轿车拥有率，辆/千人
上海	10	271	1.0	0.58	1.0	32
成都	13	273	0.99	0.37	1.0	39
青岛	11	118	1.0	0.11	1.0	47
张家港	14	226	1.0	0.91	1.0	11
合肥	11	221	1.0	0.57	1.0	69
佛山	16	221	1.0	1.0	1.0	
河内	6	110	0.8	0.4	1.0	
乌兰巴托	9		0.51	0.51	1.0	22
德里	7	133	0.57	0.40	0.7	205
孟买	3	127	0.55	0.51	0.9	51
万隆	13	136	0.28	0.27	0.98	42
开罗	12		0.89	0.91	0.99	59
哈瓦那	16	100	0.85	0.85	0.85	32
地拉那	8	150	0.95	0.91	1.0	37
斯德哥尔摩	40	228	1.0	1.0	1.0	390
莫斯科	20	555	1.0	1.0	1.0	138
巴黎	30	212	1.0	0.98	1.0	426
华沙	18	240	0.95	0.91	0.99	359
亚特兰大		358	1.0	0.98		473
墨尔本	55	380	0.99	0.99	0.99	500
雅典	26	130	1.0	0.95	1.0	354

注：资料来源：联合国人居中心（内罗毕），为 1997 年汇总的 1993 年的数据。

二、城市的主要环境地球物理问题

1. 城市气候、空气污染和热岛效应

城市，尤其是大城市，由于建筑物较多，这些建筑物的人工造型和表面极大地改变了自然地貌。例如高层建筑物、路面、广场、露天停车场会改变空气流动的方向和速率。另外，城市还由于居民的活动（生产和生活）产生大量的空气污染物，如 CO、S 和 N 的氧化物。这些污染物或是由工业生产（如炼油厂）产生，或是由燃料的燃烧（机动车或供暖）及垃圾的焚烧所产生。城市空气污染物的浓度取决于该城市及其附近地区污染物的排放总量和该地区盛行的风向和风速。在某些特殊的气候条件下，如逆温现象，即空气温度随海拔高度的增

加而增高，此时空气中的污染物由于大气层高层中存在高温区域而难于扩散，这种现象在极端情况下会因严重的空气污染导致危及人类的健康，甚至生命。例如1952年12月，伦敦由于大气逆温，引起空前严重的空气污染，导致300余人死亡于呼吸系统疾病。还有资料表明城市中心的空气污染状况要比城市边缘区域严重。近年来由于城市中机动车的数量增加，因此汽车尾气已经成为城市空气污染的重要污染源。表2－81是北京市邻近市中心的环二环路及环三环路区域与临近郊区的环四环路区域的空气质量状况。

表2－81 北京市各不同区域的空气污染状况

地　区	SO_2 日均值 mg/m³	NO_2 日均值 mg/m³	CO 日均值 mg/m³	总悬浮颗粒物（TSP），mg/m³
二、三环路区域	0.033	0.031	1.00	0.38
四环路区域	0.029	0.027	2.40	0.24
GB3095—1996 Ⅱ级标准	0.15	0.10	4.00	0.30

注：资料引自北京市劳动保护科学研究所2001年4月公布的测量结果。

表2－81的数据说明城市中心区域，由于机动车流量大，汽车尾气排放量高等原因，空气污染状况劣于邻近城郊的四环路区域。使用燃料和工业生产是造成空气污染的主要原因，表2－82为使用1t煤、1m³石油、1000m³气体燃料时所产生的污染物的数量。

表2－82 燃烧煤、石油、气体燃料时产生的污染物的数量

污染物	1t煤工业锅炉	1t煤采暖、家用炉	1m³石油工业锅炉	1m³石油采暖、家用炉	1000m³气体燃料，工业锅炉	1000m³气体燃料，采暖、家用炉
CO，kg	1.36	22.7	0.238	0.238	0.0063	0.0063
NO_2，kg	9.08	3.62	8.57	8.57	6.2	3.4
SO_2，kg	16.0S①	16.0S①	20.0S①	20.0S①	0.63	0.63
烟尘，kg			渣油2.73 蒸馏油1.80	0.952	0.286	0.302

注：资料引自《中国环境影响评价》，国家环境保护总局，化学工业出版社，2000年；
①S为煤的含硫量（%）。

由于我国能源结构中煤的比重过大，因此在采暖期和非采暖期，空气质量状况有明显差别。表2－83（1）和表2－83（2）是北京故宫博物院在非采暖期和采暖期空气质量的对照。

表2－83（1） 1998年7月（非采暖期）故宫空气质量状况

污染物	总悬浮颗粒物，TSP	二氧化硫 SO_2	氮氧化物 NO_x	臭氧，O_2	首要污染物 TSP
日均浓度，mg/m³	0.272	0.01	0.037	0.061	0.272
污染物分指数	92	10	37	25	92
质量评价	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ

表 2-83（2） 1998 年 12 月（采暖期）故宫空气质量状况

污染物	总悬浮颗粒物，TSP	二氧化硫 SO_2	氮氧化物 NO_x	臭氧，O_3	首要污染物 TSP
日均浓度，mg/m^3	0.378	0.279	0.082	0.037	0.279
污染物分指数	139	202	82	15	202
质量评价	Ⅲ	Ⅳ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅳ

注：引自田金英等：故宫博物院大气环境污染物监测报告，故宫博物院院刊，2000 年，No.3。

从表 2-83（1）及 2-83（2）可见，从非采暖期到采暖期，故宫的空气质量明显变坏，从良好（Ⅱ级）变为中度污染（Ⅳ级），主要污染物变成由于燃煤产生的二氧化硫，其浓度增加约二十几倍，同时总悬浮颗粒物也有所增加。

城市中的工厂还是主要工业品的生产基地，工业生产将带来环境污染。表 2-84 是某些主要工业品生产产生的污染物。

表 2-84 生产 1t 某些主要工业品时产生的污染物

工业品	废气，m^3	粉尘，kg	其他污染物，kg
生 铁	2700～4100	10～20	
钢	800～1000（电炉） 2000～3000（平炉）	10～15（电炉） 12～25（平炉）	
合成氨[①]	2500～3500		CO：40～100；NH_3：0.5 SO_2：8～10；H_2S：3
硫 酸	2800～3200		SO_2：25～45
烧 碱	3800～400		CO：1.0～1.2；SO_2：0.8
水 泥	4000～5900	1～24	SO_2：0.2～3.7
平板玻璃	5000～10000	3～16	SO_2：0.1～3.0

注：资料引自：国家环境保护总局，《中国环境影响评价》化学工业出版社，2000 年；
①由煤生产碳酸氢氨。

应该指出，近 20 年来，我国城市中机动车数量增加很快，因此机动车尾气排放造成的空气污染是城镇区域空气质量恶化的重要原因。近 10 年来，我国汽车产量年平均增长 13%，汽车保有量年均增长 12%，到 2000 年，我国汽车年产量达 207 万辆，保有量已经超过 1600 万辆，摩托车保有量达 5000 万辆。预计到 2005 年汽车的保有量将达 2600 万辆；2010 年将达 4000 万辆。与发达国家相比，我国的汽车社会保有量不算多，但我国汽车技术水平低下，国产车的碳氢化合物、一氧化碳和氮氧化物的排放量分别是 1992 年美国产新车的 14.5 倍、11.8 倍和 3.3 倍。有报道认为，国产汽车的技术水平比国外先进水平落后 10 年以上，而农用车辆的技术水平则落后更多。我国汽车尾气污染严重的另一原因是汽车燃油的质量不高，致使许多现代汽车排放技术难以发挥作用。还要说明，汽车尾气的排放，除了与汽车生产技术、燃油质量有关外，还和公路状况、交通管理、驾驶技术及习惯、车辆保养情况有关，是“汽车文明”的综合体现。目前国内一些汽车宣称，其尾气排放达到欧洲 2 号标准，充其量是实验室的理想结果。以江苏镇江乡镇企业发展迅速为例，全市机动车 1985

年的保有量为33891辆，1996年增加到181049辆，比10年前增加了6倍多。其中摩托车、简易机动车、拖拉机的数量增加最快。再如北京市机动车年增长速率为10%～15%，1998年底机动车保有量达135万辆。在北京采暖期的大气污染中，39%的一氧化碳（CO）、74.8%的碳氢化合物、54.6%氮氧化物（NO_x）来自机动车尾气。在非采暖期，空气污染物中的一氧化碳的60.6%、碳氢化合物的86.8%、氮氧化物的54.7%都来自机动车尾气。我国的城乡结合部有大量的拖拉机、摩托车、简易机动车等农用车辆，这些车辆的内燃机中，燃油的燃烧不完善，排放的尾气中对人体有害的气体是汽车的4倍。而且这类车辆往往使用在大城市中开始禁用的含铅汽油，致使空气中的有害成分增加。

城市中，除了空气污染以外，城市中心地区的气温要比城市周围乡村的高。例如，美国洛杉矶市区的年平均温度比周围农村约高0.5～1.5℃。还有资料认为，城市的日最低气温比远离城市的乡村最多可高6～11℃，这就是城市的“热岛效应”。在夏季的白天，城市的水泥和砖石建筑物及沥青路面与有更多植被覆盖的乡村相比，在每单位面积上吸收、储存和再辐射更多的太阳能；在夜晚，城市的建筑物和街道向大气辐射更多的热量。这些都会导致城市上空的大气温度明显高于乡村。在冬季，由于取暖、发电厂、工业和机动车耗用燃料使城市上空的大气温度略高于乡村。而且，城市中由于使用燃料等原因产生的污染物在大气中的散布，增加了对太阳能的吸收，也会使城市上空大气的温度升高。北京在发生热岛效应时，城乡温度差可达6～7℃。

由于城市地区的植被面积比乡村少，因而降水的流失程度大，同时在城市缺少来自植被的蒸发和蒸腾作用，因此城市中的平均相对湿度要比乡村低百分之几。另外，通过城市的风速要比附近乡村的风速低20%～30%。其原因是城市的地表粗糙，林立的建筑物增加了对气流的摩擦阻力。城市中气流流动的另一特点是由于城市的热岛效应，在同一海拔高度上，城市的大气温度高于附近乡村，即在同一水准高度上出现以城市中心为温度高点的温度梯度，因此在城市上空的低空，来自各不同方向的风，最后总是趋向流入城市。即气象学中称之为“城市上空低空的风是收敛的”。表2－85是我国部分大城市城乡温度差异。

表2－85　我国部分大城市热岛效应强度与城市规模、人口密度的关系

城市名称	气候类型	城区面积 km²	城区人口 万人	城区人口密度 人/km²	城乡年平均温差，℃
北　京	温带亚湿润气候（南）	87.8	239.4	27254	2.0
沈　阳	温带亚湿润气候（中）	164.0	240.8	14680	1.5
西　安	温带亚湿润气候（中）	81.0	130.0	16000	1.5
兰　州	温带亚干旱气候（中）	164.0	89.6	5463	1.0

注：资料为1993年的数据，引自：朱瑞兆等：《中国不同区域城市热岛研究》。

从表2－85可见，城区过于集中时热岛效应明显增强，在城区面积接近时，人口密度对热岛效应的影响明显增大。

城市上空的热岛效应实际上是城市热物理环境问题，也就是城市热物理场的分布及其影响问题。人类对城市热环境的研究已经有近200年的历史。早在1818年，英国的L. Howard就根据其多年来对伦敦城市温度场的观察，出版了《伦敦气候》一书。在20世纪20年代末期以前，对城市热物理场的研究是属于“静态的”，即以特定的城市为目标，在城

市内外的若干个有代表性的观测点上的数据为依据，研究结果是城市温度或雾日的月、季、年的平均值和累计值。由于观测手段和数据规模的限制，这些观测和研究无法对建筑物对城市气候的影响进行评价，也还不能做出城市温度场的分布图。从 1927 年开始，W. Schmidt 用装在汽车上的设备对城市的温度场进行动态观测，使对城市热物理场的研究在观测方法上有了重要改变。1936 年出版、1956 年再版的《城市气候》（P.A. Kratzer）体现了这一阶段对城市热物理环境的研究结果：以动态的观测数据，对城市的热物理场的变化进行了研究，但还不能对建筑物与城市热物理场的关系给出详尽的说明和研究。20 世纪 50 年代末期以后，对城市热物理场的研究在方法和技术上有了一系列重大的变革：使用了人造地球卫星遥感、航空测量等观测技术手段；对城市热岛效应的观测扩大到三维及四维；使用计算机对城市的热岛效应进行数值模拟研究；使用风洞等实验设备对数值模拟结果进行检验。由于观测技术手段和研究方法的进步，使对城市热岛效应的研究有了相当的深化：1969 年 L.O. Myrup 提出城市热岛的数值模型；1971 年 M.A. Atwater 研究了在有城市空气污染条件下，太阳辐射的收支平衡关系。但是现有的模型和理论对描述城市热岛这样复杂的系统，还显得过于粗糙。例如，L.O. Myrup 的城市热岛数值模型虽然说明了城市热岛的存在，但在时间上与实际的观测结果差异明显。其原因是建筑物（如建筑物表面粗糙程度）对气候影响的各种参数的认定和选择困难。

2. 城市垃圾

城市垃圾主要包括：

（1）工业固体废弃物。这是指热电厂、锅炉、窑炉、茶炉在运行过程中产生的粉煤灰，钢铁厂、铸造厂的冶炼废渣，化工厂的废渣，煤矿的煤矸石等。1995 年我国工业固体废弃物产生量达 6.4 亿 t，2000 年全国工业固体废弃物产生量达到 8.16 亿 t（其中乡镇工业产生的固体废弃物为 1.5 亿 t）。这些废弃物中相当一部分是可以综合利用的。2000 年，全国县以上工业产生的固体废弃物中被综合利用的达 3.74 亿 t，为县以上工业废弃物产生量（6.65 亿 t）的 51%。再以北京市为例，1998 年共有 1295 个工矿企业共产生工业废弃物 1136 万 t，其中 949 万 t 已被利用，综合利用率达 76.8%，另有 35 万 t 得到妥善处置，还有 152 万 t 在露天堆放，使历年工业固体废弃物的累计堆积量达 11475 万 t，占地 375 万 m^2。

（2）城市生活垃圾。这是城市居民生活产生的包括排泄物在内的各种废弃物。有统计表明我国城市每人每天产生 440g 生活垃圾（全球人均值为 900g），2000 年我国共产生城市生活垃圾约 1 亿 t。城市生活垃圾的产生量还在以每年 8%～10% 的速率增加。以北京市为例，城市生活垃圾以每年 3% 的速率增加，1997 年共清运城市生活垃圾 495 万 t。随居民生活水平的提高，生活垃圾中，有机物增加，可再生利用的成分（包装盒、塑料等）、可焚烧成分增加。北京市每天仅一次性餐盒的日需求量就达 200 万个，其中 90% 是在自然条件下难以降解的发泡餐盒（治理一个发泡餐盒造成的环境污染的费用是餐盒自身价格的 10 倍）。我国城市生活垃圾的无害处理水平不高，相当一部分城市生活垃圾就在城市郊区堆积。我国各地已经累计堆积工业固体废弃物和城市生活垃圾约 67.5 亿 t，占地约 5.6 万 hm^2。这些堆积的垃圾往往又是二次污染源。

（3）危险废弃物。这是指一些化工、轻工、电子、制药工业以及医院产生的含有毒和有害物质的废弃物，约占工业固体废弃物产生量的 3%～5%。根据国际上通行的《控制危险废物越境转移及其处置巴塞尔公约》中规定的危险废弃物的分类原则，国家环境保护总局等公布的《国家危险废物名录》已于 1998 年 7 月起施行。该名录中危险废弃物包括医院、医

药、农药废物，染料、涂料废物，爆炸性废物，感光材料废物，含铍、铬、铜、锌、砷、硒、镉、锑、碲、汞、铅的废物，废碱、废酸废物，含有机磷、有机氰等废弃物共 47 类。多数是工业生产产生的废弃物。另外生活中的某些废弃物，如照相馆的废液、日光灯管、废电池也是危险的废弃物。这些废弃物多数都是可回收利用的。以北京市为例，1998 年共产生工业废弃危险物 36702t，其中 31243t 已经再生利用（综合利用率达 85%）。

目前城市垃圾处理的方式有：

（1）露天堆放。仅将垃圾运到城镇以外，不做处理，往往成为二次污染源。

（2）卫生填埋。是世界上普遍采用的处理方法。1989 年美国城镇采用卫生填埋方法处理的城市生活垃圾量达产生量的 95%（1995 年北美为 68%，欧洲各国为 60%～70%，日本为 50%）。这种处理方法的缺点是：第一，占地面积大，每填埋 1t 垃圾要占地 $3m^2$，若日填埋量为 1000t，一年要占地近 110 万 m^2。第二，填埋场地周围地表及地下水易受到垃圾渗出液的污染，尤其是重金属含量要比背景值高很多，在填埋场上空，空气中汞的含量可能比背景值高 10～15 倍。第三，垃圾中有机物含量高时，易产生甲烷，处理不当会发生火灾甚至爆炸。研究表明，垃圾中有机物含量为 20%时，每吨垃圾可产生甲烷 $100m^3$。

（3）焚烧。在 850～1200℃将垃圾焚烧为灰渣，然后再将灰渣填埋。第一座垃圾焚烧炉于 1874 年建于英国的诺丁汉，后传入美国，经过百余年的演变，现代的垃圾焚烧炉能回收热能（用于发电），可使垃圾减量 50%～95%，而且能灭菌，焚烧炉处理量大，占地少。有些国家将城市生活垃圾焚烧作为燃料和建筑材料，已经成为产业。垃圾焚烧的缺点是焚烧炉成本高，建一座日处理 400t 垃圾的焚烧炉的设备约需 2 亿元（国产设备）至 3 亿元（进口设备）。在焚烧垃圾使之用于发电时，还要求垃圾的发热值在 800kcal/kg 以上。我国中小城市的生活垃圾水分高，发热值低，因此要加重油才能燃烧，使运行费用增加。焚烧垃圾还烧掉可回收的再生资源和有机质。在炉温低于 850℃时，会产生致癌物质二噁英，另外垃圾焚烧过程中还会产生其他有害气体（金属“飞灰”，酸性气体等）。因此，在我国，尤其是中小城市，建立垃圾焚烧炉应该慎重。

（4）堆肥。用自然界存在的微生物使堆放的垃圾中的有机物降解、发酵，产生腐殖质，可作为农家肥料。但城市垃圾中建筑材料（碎砖瓦、碎玻璃）过多时，堆肥处理的效果有限。

对垃圾处理的原则应是资源化、无害化和减量化。垃圾中可再生利用的物质很多，回收这些物资，可节约大量资源：回收 1t 废钢铁，可节约 20t 矿石；回收 1t 废纸，可生产再生纸 800kg，可节约木材 $4m^3$，烧碱 300kg，节电 300kW·h。目前全世界矿产资源的再生利用率已经相当高，钢铁的 18%，铜的 45%，锌的 30%，铅的 22%，纸的 35%来自再生资源。还有研究表明，我国每年产生的各类垃圾中，约有价值 250 亿元的可再生资源，将这些资源回收加工可产生价值约 2500 亿元的财富。

用地球物理和地球化学方法检测城市垃圾的堆积、填埋过程，是近年来地球物理和地球化学学科中新的应用领域。对垃圾填埋场及其附近区域的电法勘测（电阻率或电导率测量，自然电位测量）、重力场或密度观测、自然放射性测量、地热场或地温测量可以检测被填埋的垃圾的积聚量、积聚密度和扩散范围，对地下水的影响和污染，还可检测垃圾中的某些特殊物质（如放射性污染物）。对垃圾填埋场中垃圾样品和渗出液化学成分的检测则有助于对二次污染的监控。

第七节　石油工业中的环境问题

一、世界和中国石油工业发展概况

石油又称原油，是从地下深处开采出的浅黄色至棕黑色可燃性粘稠液体，是古代海洋或湖泊中的生物经过漫长的演化形成的混合物，与煤一样属于化石燃料。密度为 0.8～1.0g/cm³，组成石油的化学元素主要是碳（83%～87%）、氢（11%～14%），其余为硫（0.06%～0.8%）、氮（0.02%～1.7%）、氧（0.08%～1.82%）及微量金属元素（镍、钒、铁等）。可见碳和氢化合形成的烃类构成石油的主要组成部分，约占 95%～99%。石油粘度范围很宽，凝固点差别很大（-60～30℃），沸点范围为常温到 500℃ 以上，可溶于多种有机溶剂，不溶于水，与水形成乳状液。

1. 世界石油工业发展概况

石油的发现、开采和直接利用由来已久，我国在宋代出版的《梦溪笔谈》中就有关于将出自地下的可燃性液体命名为石油，并记述其用途的文字。现代石油的工业开发利用是 19 世纪中叶以后形成的：1840 年前后，原沙俄在里海滨的巴库附近发现并开采石油；1859 年，在美国宾夕法尼亚州泰斯维勒发现了石油，并于 2 年后在当地建成投产了世界第一座炼油厂。而全球石油石化工业的形成、发展和走向成熟是在 20 世纪。

石油勘探开发在过去的百余年中走过了漫长的发展和壮大之路。1900 年世界石油年产量仅为 2043 万 t，主要集中在沙皇俄国和美国，两国的产量占世界当时总产量的 93.47%。此外只有波兰、罗马尼亚、荷属东印度（现印度尼西亚）等少数国家和地区有生产。20 世纪 60 年代以后世界大批殖民地、半殖民地国家获得独立，从西方石油公司手中收回石油主权后，发展中国家的石油石化工业得到了迅速发展，成为不少国家的支柱产业。据统计，到 20 世纪末，生产石油的国家和地区已经达 93 个，生产天然气的国家和地区达 71 个。1999 年世界原油产量总计为 32.8339 亿 t，天然气产量总 23237 亿 m³（2000 年为 24223 亿 m³）。2000 年底，全球剩余探明石油储量为 1402.8 亿 t。图 2-8 是 1970～1999 年世界油气储量的对比。表 2-86 是原油和天然气已探明的可开采储量。

石油加工利用并逐渐形成石油炼制（简称炼制）工业始于 19 世纪中叶，20 世纪 40～50 年代形成现代炼油工业，并成为最大的加工工业之一。19 世纪中叶，炼制工业的产品主要是灯用煤油，而汽油则当废料抛弃。19 世纪 70 年代建成了润滑油厂，并开始把蒸馏得到的高沸点油做锅炉燃料。19 世纪末内燃机的问世使汽油和柴油的需求猛增，仅靠原油的蒸馏（即原油的一次加工）不能满足需求，于是诞生了以增产汽、柴油为目的，综合利用原油各种成分的原油二次加工工艺。如 1913 年实现了热裂化，1930 年实现了焦化和催化裂化，1940 年实现了催化重整，此后加氢技术也迅速发展，这

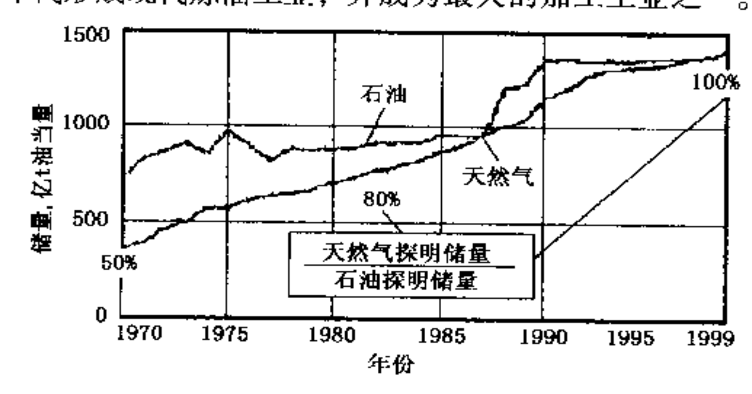


图 2-8　1970～1999 年世界油气储量对比
（资料来源：姚磊等：世界天然气工业现状，能源研究与信息，2001，17（2））

就形成了现代的石油炼制工业。随着经济的发展、工业化进程的需要、技术的进步，石油加工工艺从一次加工发展到二次加工，进而扩展到三次加工，亦即从热加工拓展到催化加工，进而发展到深度加工。石油产品也随之大大增加，形成了目前的汽油、柴油、煤油、燃料油、润滑油脂、石油蜡、石油沥青、石油焦、石油溶剂和化工原料等大类产品组成的石油产品大家族，具体品种达几千种。炼油能力 20 世纪初略高于 2000 万 t/a，1999 年底为 40.44 亿 t/a，增长约 200 倍。目前已有 120 个国家和地区拥有炼油能力，其中北美占 24.5%，亚太地区占 24.2%，中东占 6.7%，西欧占 17.01%，东欧及独联体国家占 14.2%。表 2－87 是 2000 年世界石油加工能力前 10 名的国家。

表 2－86　原油和天然气已探明可开采储量

项目 地区	原油，亿 t 已探明可开采储量	天然气，亿 m^3 已探明可开采储量
世界	123 5.59	10 933
非洲	8 0.33	7 249
北美和中美洲	13 1.32	10 708
南美洲	8 9.73	4 658
亚洲	82 3.23	37 536
欧洲	2 7.97	6 656
大洋洲	3.01	1 439

注：摘自宁大同等：全球环境导论，1996。

表 2－87　2000 年世界石油加工能力前 10 名（按顺序排列）

序号	国家或地区	炼厂数	原油加工能力，万 t/a
1	美国	152	82692.7
2	原苏联	59	41998.2
3	日本	35	24810.43
4	中国	97	21734
5	韩国	6	12800.5
6	意大利	17	11795.5
7	德国	17	11295
8	印度	17	10566.2
9	巴西	13	9590.41
10	加拿大	21	9531.25

注：译自美国《油气杂志》，2000 年 12 月 18 日。

20 世纪后期开始，随着高新技术的发展，石油化工又进而向精细石油化工和高附加值产品生产领域拓展。石化产品也从三烯三苯、有机化工原料、合成氨、尿素、三大合成材料（合成树脂、合成纤维、合成橡胶）进而扩展到表面活性剂、三剂（助剂、添加剂、催化剂）、特种溶剂、黏合剂、水处理剂、清洗剂、各种中间体、造纸化学品、油田化学品、信息化学品等精细石化品和专用化学品生产领域。

作为石油化工标志的世界乙烯生产能力，在石油化工起步初期的1950年仅为46万t/a，到2000年初已跃增为9270.4万t/a，截至2001年1月1日，世界乙烯生产能力达10059.9万t/a，增加200多倍；作为乙烯装置最主要的下游产品之一的世界合成树脂产量，1950年仅仅为150万t，2000年约为1.6亿t，增加了105倍。1950年只有美国生产乙烯，到20世纪末已经有54个国家和地区生产乙烯，发达国家19个，发展中国家35个。

到20世纪中叶，石油在一次能源消费中的比重超过煤炭，成为世界能源供应的主力。目前，世界能源消费结构中石油和天然气占世界总能源消费的62.9%，居诸能源首位，因此有人将20世纪称之为“石油世纪”，把石油誉为工业的血液　预计在未来20年内，世界经济将保持每年3%～4%的增势，20年内，全世界的能源消费将增长59%，石油仍将是世界主要能源，世界石油需求量平均年增长1.9%左右。

2. 中国石油工业发展概况

中国是世界上最早发现和利用石油的国家。早在2000年前的西汉时期，古人在陕西延长一带发现了石油，《汉书·地理志》就已有记载。北宋科学家沈括在《梦溪笔谈》中第一次使用了“石油”一词，曾详细描述了石油的形状及当地人开采使用的情况，并预言“此物后必大行于世”。

但在新中国成立前，中国一直是一个“贫油大国”。当时全国的石油资源预测只有2亿t，玉门油矿年产原油仅有9万t。从1904年到1945年间，旧中国累计生产原油只有278.5万t，平均年产原油8.7万t，而此间共进口“洋油”2800万t。

新中国的成立翻开了中国石油工业发展崭新的一页。1955年10月31日在新疆准噶尔盆地发现了克拉玛依油田，1959年9月26日发现地处黑龙江省松辽平原的大庆油田。1963年11月8日，周恩来总理在第二届全国人大四次会议上向全世界庄严宣告：中国原油已基本实现自给。1967年，中国石油工业开始从陆地走向海洋。1975年，大庆油田原油产量突破了5000万t，并持续26年产量超过5000万t，跻身于世界特大型油田的行列。随着辽河、胜利、大港、中原、华北、江汉等油田相继发现和开发，1978年中国原油年总产量突破1亿t，从此进入世界产油大国行列。目前已经先后在全国21个省、市、自治区建成20多个石油、天然气生产基地，广泛分布于东北、华北、中原、华中、华东、西北和西南等地区。2000年，全国的石油资源预测最新评价数字为1068亿t；2000年中国原油产量为1.63亿t，天然气产量272.14亿m^2；2001年产量为1.65亿t，天然气产量为303.44亿m^3。

中国石化工业经过50年的建设和发展，目前已有原油加工企业127家。除西藏、海南、云南、贵州以外的省、市、自治区都建有炼油厂，18套乙烯装置遍布15个城市。截至1999年底，我国原油一次加工能力达到2.76亿t/a（居世界第3位，综合配套加工能力2.2亿t/a），1999年加工原油1.76亿t，生产汽、煤、柴三大类油品1.05亿t，基本满足国内市场需求。乙烯生产能力达到442万t/a（居世界第5位，），同年乙烯产量为434.6×10^4t，满足国内市场的46.4%；五大类合成树脂（聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯、聚氯乙烯、ABS）的生产能力为915.6万t/a（居世界第5位），产量842万t/a，占国内市场消费量的49.4%；合成橡胶的生产能力为85.9万t/a（居世界第4位），产量为66万t，占国内市场消费量的71.6%；合成纤维原料的生产能力为341万t/a，产量为323.4万t，占国内市场消费量的56.3%。

但总的来说，我国石化加工企业规模不大，炼厂平均规模仅160万t/a，最大炼厂规模为1350万t/a。乙烯装置的平均规模不足25万t/a。加工能力小于100万t/a的小炼厂76

家，占炼厂总数的60%。

预计“十五”期间，中国的汽、煤、柴油消费量将以年均4.3%～4.6%的速度增长，到2005年，汽、煤、柴三大类油品总需求量预计达到1.36～1.38亿t；乙烯需求将以年均8.5%的速度增长，预计到2005年，乙烯需求量约为1500万t；五大合成树脂年均增长速度预计达到7.0%～8.0%，预计2005年，五大合成树脂需求量为2500～2700万t；合成橡胶的消费预计年均增长4%左右，预计2005年，需求量110万t左右。合纤原料的年均增长速度5.4%～8.3%，预计2005年，需求量为1080～1260万t。

二、石油工业的水环境污染问题

目前，中国经济增长的20%要归功于石油工业。石油工业在为经济发展做出重大贡献的同时，也带来一系列的环境问题：油气勘探开采和石油化工生产中的废水、废气、废渣等污染物都会对水体、大气、土壤和生态环境造成影响。当前影响全球的主要生态环境问题，即温室效应、酸雨和臭氧层破坏，都与石油工业有着密切的联系。如造成温室效应和酸雨的原因，是大量排放CO_2、SO_x和NO_x，而化石燃料的燃烧是CO_2、SO_x和NO_x的重要来源。从勘探、开发、加工、储运销售直到使用，不论是经常性的还是突发性的污染物排放，其污染物数量大而且危险严重，所以说在全球范围内，石油工业是环境污染物的最大来源之一。正因为如此，在全球范围内，石油工业也是环保费用支出最多的一个产业部门。美国政府要求，在1995～2015年间，所有油罐均需采用双层外壳，仅此一项，约需费用7亿多美元。

除了气体污染物外，石油、天然气勘探、开发和生产以及加工过程中所排放的废水，是工业废水的重要来源。

1. 钻井过程中的废水

(1) 钻井废水。钻井施工包括钻前准备、钻井、完井、固井等生产过程，每个过程都有废水排放。钻井废水的来源主要有：冲洗钻井平台、钻具、振动筛的废水、泥浆罐定期清洗废水、起下钻钻井液的流失、钻井液循环系统渗漏产生的废水、冲洗钻井岩屑的废水、井口返排水以及井场上的雨水等。这些废水经井场上的地面管沟排到废水池中。一般情况下，废水经处理后可以用于配置钻井液或冲洗钻台。完井后，钻井废水封存于井场的废水池中。在北方干燥地区，经过一段时间的自然蒸发和渗漏，就可以恢复井场地貌。但在南方，由于雨水较多、地下水位较高，废水很难被自然蒸发和渗漏，废水长期封存在废水池中，在雨季很容易溢出而对周围环境造成污染。

钻井废水是钻井液高倍稀释的产物，废水的组成与钻井液体系有很大关系。总的来看，钻井废水的组成有以下几个特征：pH值高，钻井液废水的pH值大多在8～9.0之间；悬浮物含量高，在钻井液中含有大量的粘土和钻井液加重剂，同时钻井液在循环过程中还携带了一些钻井岩屑，这些固体颗粒很容易进入钻井废水。钻井废水从地面流进废水池，还会携带一些地面的泥砂和表层土；有机、无机污染物含量高，在钻井液中含有各种有机、无机的钻井液添加剂，以及一些防塌剂、防卡剂、降失水剂等。在油基钻井液中还含有大量的原油。

(2) 废弃钻井液。废弃钻井液主要来源于钻井和完井两个生产过程。主要有以下几个方面：一是由于地层性质的变化，因钻井液性能要求不同而更换钻井液体系产生的废弃钻井液，二是钻井完工后弃置于井场的钻井液，三是钻井液循环系统的跑、冒、滴、漏产生的废弃钻井液。废弃钻井液经常存在井场的泥浆池中，其中一部分仍有利用价值，可以再利用。

废弃钻井液的组成比较复杂，由于钻井液体系不同，各类废弃钻井液的组成差别也比较大。我国各油气田使用的钻井液主要有水基钻井液、油基钻井液、气基钻井液等几种类型，

各种钻井液的添加剂不同。其中水基钻井液应用最广，约占98%以上。钻井液一般由固相、液相和化学处理剂三部分组成。使用的化学处理剂种类繁多，目前共有16大类246种，这些化学处理剂不同程度都含有污染环境的物质，钻井液中存在对环境有害的物质是油类、盐类、可溶性重金属元素（锌、铅、铜、镉、镍、汞、砷、钡和铬）、有机污染物和高pH值处理剂等。其中部分处理剂中有害成分毒性很大，并能在环境或动植物体内蓄积。这些污染物一部分可能是随钻井的地层进入钻井液的，有机污染物可能是来自钻井液处理剂的分解产物，无机污染物可能是伴随钻井液处理剂及其材料而来的。部分废弃钻井液可回收利用，另一部分在完井后遗留在井场，这部分废气钻井液如处理不当会对水环境造成污染，钻井液中的污染物可能渗入地下水，从而影响地下水质，另一方面废弃钻井液因雨水冲刷进入河流而污染地表水体，或外溢流入农田、虾池，对井场周围的生态环境产生危害。

我国目前对于这类物质除回收利用一小部分外，基本上采用直接排放和自然浓缩、干化、就地掩埋的方法，其中许多有害物质都超过国家规定的排放标准。在钻井完毕井场搬迁以后，遗留的废钻井液，成为油气田开发建设过程中的污染物。另外，我国许多油田，尤其是老油田钻井井位就在稻田、麦田、鱼塘、虾池及居民区附近，对生态环境的影响更加直接、明显。

国外从20世纪50年代就开始进行钻井液毒性的雨季测试工作，20世纪70年代从事处理废钻井液的研究，并对八种基本类型钻井液（氯化钾聚合物、海水木质素磺酸盐、石灰钻井液、不分散钻井液、海水开钻钻井液、海水或淡水胶凝钻井液、轻度处理木质素磺酸盐淡水钻井液）进行了生物鉴定，确定了水基钻井液是微毒或基本上无毒的。

2．采油（气）废水

采油（气）废水是伴随原油和天然气从地层开采而来的。为了保持油层压力，延长油井自喷期，提高采收率，在油田开发过程中，采用人工注水的办法向油层补充能量。采出的原油的含水率就不断上升。目前我国东部老油田的综合含水率已经达到80%以上。水和原油一起进入原油集输系统，经破乳、脱水后，形成油气田所特有的采油废水。大量的采油废水经处理后回注地层，但由于地层条件、注水能力、事故等原因，仍有一部分需要外排。

采气井废水，主要是在气井中除气层外，尚有水层存在，或气层中含有原生水，当气井降压采气时，水层的水或气层共生水也会与天然气相伴而产出地面。气井产出的水经气水分离后，经过简单处理可用于制盐或回灌到废井中去，一般不允许外排。

由于采油（气）废水是随着原油或天然气从地层开采出来的，废水中不仅携带有原油，而且还在高温高压的地层中溶进了大量的盐类和气体，具有较高的矿化度。另外，在原油脱水过程中，需要添加各种化学添加剂进行破乳、脱蜡，废水中还含有大量的高分子有机物质。

3．井下作业废水

井下作业包括修井、压裂、酸化、热油清蜡、冲砂等工艺作业，每种作业都有污染物排放，影响水环境的主要污染物是作业废水和落地原油。

酸化压裂作为油气田的一种有效的增产措施，在气田上得到了广泛的应用。一般酸化作业的盐酸浓度为15%～20%，作业后产生的残酸pH值在1～3，尽管作业后残酸经石灰中和处理，但因Cl^-浓度极高（一般在5×10^4mg/L左右，最高达10×10^4mg/L以上），同时还含有表面活性剂和缓蚀剂等多种有机物，若使用水基压井液，其废液中的污染物几乎全是有机物，这些废液排出将污染环境。

采油井在开采使用一段时间后，其结构疏松的砂岩油层、油井出砂情况比较严重，大量的泥砂沉积或吸附在井筒之中，影响原油生产和损坏抽油泵，这时就需要对油井进行洗井冲砂。使用大量的、携砂能力较强的冲砂液洗井，把砂冲出井口，在这一过程中有一定量的冲砂洗井液排放。

产生废水量比较大的是注水井的洗井作业，为了防止注水井中的悬浮固体堵塞地层，注水井运行一段时间后，或注水井进行井下施工后，需要进行洗井作业。用大量的清水对注水井进行冲洗，大量的冲洗水从井底排出，即为洗井废水。一般情况下，洗井废水通过回收管线进入联合站处理后可回注地层，而边远井和单井的洗井废水往往需要外排。

作业废水主要携带了井底的污染物，主要有以下特征：悬浮物含量高，井底大量的悬浮固体和泥砂随洗井水返排出来，含有大量的有机物；作业废水的色度较深，一般都是黑褐色。

井下作业过程中的落地原油，主要是在试油、修井、压裂等生产过程中，从井口放喷的原油；起下油管、抽油杆散落地面的原油。

4. 油田化学制剂的污染问题

油田化学制剂，广义上指用于石油勘探、钻采、集输等所有工艺过程中的各种化学制剂品，主要包括矿物产品（如斑土等）、各种酸和碱、淀粉、碳酸锌等和如聚合物、表面活性剂等。从应用上看，油田化学品分为：（1）钻井用化学制剂。其品种和数量均占全部油田化学品的65%～70%。（2）钻井液处理剂。指在钻井液配制和处理过程中所用的化学剂。（3）水泥外加剂。指在固井作业中，为保证施工顺利和固井质量，在固井水泥中所添加的化学剂。（4）油气开采用化学品。为满足工艺要求，提高酸化、压裂效果或用于油、气、水井增产增注所用的化学剂等。（5）提高采收率用化学剂。是指为提高石油采收率，在三次采油（EOR）过程中所用的化学剂。（6）油气集输用化学剂。指在油气集输过程中，为保证油气质量，保证生产过程安全可靠和降低能耗所用的化学剂。（7）水处理用化学剂。指在油田注水（水源水、回注污水）、水处理过程中，为保证注水质量，提高注水开发效果所用的化学剂等。

据统计，全国油田化学产品种类达300余种，年用量120万t，其中精细化学品35万t；世界油田化学品现已有70多类3000多个品种。据世界120个公司统计，仅用于采油的化学品就有988种。随着石油工业的发展，油田化学品耗量愈来愈大，其用量在10年间增长了52%，预计我国油田化学品的消耗量将以年均10%的速率递增。北美是世界消费油田化学品最多的地区，约占总量的一半，其中美国又是该地区消量最大的国家。世界仅采油用化学品每年耗量就达450万t（约占油田化学品总量用量的1/3）。如此多的油田化学品如果不加处理就随废水直接排放，势必会对环境造成很大的危害。

5. 石油化工工业中的废水

石油化学工业分为四大行业，石油炼制，石油化工，合成纤维，石油化肥。

炼油化工污水主要来源于各生产装置的循环水排污、油品洗涤废水、油气冷凝废水、机泵冷却废水、原料油脱水、地面冲洗水、设备冲洗水、油罐排水等几个方面，其水质、水量与炼化产品、原料性质、加工过程及工艺方法有密切的联系。主要有以下几种类型的废水：

（1）含油污水。主要来源于各炼油装置的油品洗涤、油气冷凝、机泵冷却、地面冲洗水、设备冲洗、油罐排水等工艺过程，是炼油厂排放量最大的一种废水。主要含油，也含有硫化物、挥发酚及有机溶剂等污染物，其中石油类物质通常以浮油、分散油、乳化油、溶解油四种状态存在于水中。

（2）含硫污水。主要来自炼油厂的二次加工，如催化裂化、加氢精制及常减压装置的分

离罐排水、富气洗涤水。除了含有大量的硫化物外，还含有大量的酚、油、氨和硫醇等污染物，含硫污水含硫浓度因原油含硫量和加工深度不同而异，一般含硫化氢在300～700mg/L之间的称为低浓度含硫污水，在1000～5000mg/L的称为中浓度含硫污水，5000mg/L以上的称为高浓度含硫污水。含硫污水具有较强烈的恶臭和较强的腐蚀性。

（3）含碱污水。主要来自炼油厂常减压和催化裂化装置碱洗水，主要含游离态碱，还含有大量的油、酚，这种废水乳化严重，呈乳白色。

（4）含盐污水。主要来源于原油电脱盐排水和酸碱中和排水，这种废水除了含有很高的氯化物外，同时含有油和挥发酚等污染物。

（5）循环系统排污水。主要来自冷却水循环系统，水温在35～45℃度之间，污染程度相对较小，污水中主要污染物为盐和水质稳定剂。

6. 机加工废水

机加工废水主要来源于锻冲、零件加工中的切削、材料的热处理和表面清洗、机器冷却、电镀废水、工人洗手等。

机加工废水主要分为一般机加工污水和电镀废水。机加工污水中主要污染物是石油类和悬浮物。电镀废水的组成比较复杂，主要含有各种金属离子、各种化学添加剂、酸、碱，以及镀件预处理过程中清除下来的各种杂质，包括油污、氧化铁皮、尘土等。

7. 电厂废水

电厂废水的来源主要有三个方面：（1）冲灰水。为了防止炉渣和粉煤灰污染大气环境，电厂产生的粉煤灰用水淋湿，在冲洗过程中排放冲灰水，冲灰水在电厂排放的废水所占的比例较大；（2）离子交换车间排水。电厂锅炉的用水是经离子交换软化的去离子水；（3）循环冷却水。电厂冷却水一般经冷却塔降温后循环使用，直接排放的只有少量，冷却水使用一段时间后，盐含量增加，需要排放一些废水。电厂废水主要含有各种离子和悬浮物。

除了上述的废弃物和废水外，随着油田替代产业的兴起，多种经营企业在数量上大幅度增加，产生了新的污染。另外，油气田职工生活也要排放大量的废水和生活垃圾。石油企业医院及卫生防疫单位排放的污水主要来自病房、手术室、洗衣房、浴池和厕所。与工业废水相比，这类排水虽然排量不大，但危害较严重，与一般的生活污水亦有区别。其主要污染物为病原微生物。

石油工业产生的废水会污染环境，会对土壤、农作物、水生生物、地面（下）水和人体健康等造成危害。如气田废水矿化度高，并含有大量的氯化物、油、硫化物，有的还含有Cd、Pb、Zn、As等有害元素。钻井液中的无机盐（如NaCl、KCl、$CaCl_2$、Na_2SO_4等）含量在土壤中积累到一定程度会使土壤盐碱化，从而使地力下降。气田水进入土壤后，因Na^+的交换作用，土壤粒子上Ca^{2+}、Mg^{2+}被交换进入水中，随着气田水渗透进入表层地下水，尤其是浅层地下水，使地下水的永久硬度升高，若开采利用，就会增加软化处理费用。地下水中NaCl含量升高，水型变成了NaCl型，即使用作工业用水，也会增加脱盐处理费用。其次，气田水通过土壤或注水井漏层（或套管破裂）渗漏，或因注水层层位浅，使气田水进入地下水，因Cl^-或重金属的污染，使地下水利用价值降低甚至不能利用。例如美国1960～1961年间发现废油气井（美国很多废油气井都作为废液回注井）附近地下水中氯化物含量高达51,000mg/L，比油田开采前上升了800多倍。例如加拿大规定废钻井液中氯化物含量小于等于1000mg/L，硫酸盐小于等于2000mg/L，可溶固项小于等于4000mg/L，pH值为5.5～8.5时方能填埋，否则将会引起土地盐碱化。中国石油天然气集团公司每年产

生钻井废水 136 万 t，废弃钻井液 50 万 t，钻井岩屑 50 万 t，落地原油 20 万 t。部分油田由于进入开采中后期，原油含水率高，每年采油（气）废水的产生量为 4.1000 亿 t。

我国石化行业是我国排放废水、污水的主要行业之一。在组建石油、石化两大集团之前，原石化总公司有 25 家特大型和 13 家大型炼油、化工、化纤和化肥生产企业。这些生产企业分布在 21 个省市自治区内，长江、黄河、珠江、淮河、海河、松花江和辽河等七大水系流域均有石化总公司的下属生产企业，仅长江两岸就有 9 家直属生产企业。这些企业每年消耗新鲜水 14.9 亿 t，约占全国总用水量的 0.3%，占工业用水总量的 2.87%。1997 年废水排放总量为 8.57 亿 t，占全国生产和生活废水排放总量的 2.34%，其中工业废水排放量约占全国工业废水排放总量的 3.85%。

我国石化行业很重视废水、污水的治理和再利用。1990 年至 1996 年石化总公司原油加工量增长了 22%，工业总产值增长了 47%，而外排污水 COD 总量却下降了 5.7%，万元产值排 COD 量下降了 6%，外排污水全面达标率上升了 13.7%。1997 年石化总公司工业废水综合合格率（含氨氮）达到 89.48%，其中化肥行业达到 96.0%，化纤行业 90.28%，炼油行业 89.41%，化工行业 88.25%。但与国外先进水平相比还有差距，如 1997 年全系统还有 10.52%（约 8600 万 t）的工业废水未达到标准排放了。表 2－88 是 2000 年中国工业企业和石油加工及炼焦业废水排放及处理情况。

表 2－88　2000 年中国工业企业和石油加工及炼焦业废水排放及处理情况

行业	汇总工业企业个数	工业废水排放总量，万 t	工业废水排放达标量，万 t	废水治理设施套数	工业废水处理量，万 t	工业废水处理回用量，万 t	废水处理排放达标量，万 t
石油加工及炼焦业	720	48500	45817	1240	54098	14251	38285
全国	70944	1942405	1493277	64453	3482625	2441945	914610

注：资料来源：2001 年中国统计年鉴。

我国石化行业在减少废水、污水排放方面存在很大潜力。1997 年全国加工原油 1.54 亿 t，其中石化总公司加工 1.25 亿 t，炼油行业消耗新鲜水 4.26 亿 t（按工业用水统计为 3.66 亿 t），平均加工每 t 原油耗水 3.41t（按工业用水统计为 2.93t）；排放废水总量为 2.96 亿 t（按工业废水统计为 2.73 亿 t），加工每吨原油排放废水 2.37t（按工业废水统计为 2.19t）。国外炼油企业加工 1t 原油废水排放量大多在 0.1t 以下，先进水平仅 0.1t。国外有的炼油厂现在甚至可以做到废水全部回用，基本上不向外排放废水。如日本兵库炼油厂，平均加工 1t 原油的废水排放量仅为 6～7kg。而日本科斯莫（COSMO）公司千叶炼油厂，炼油加工能力为 1200 万 t/年，年排放废水不到 3000t，平均每加工 1t 原油排放废水不到 0.25kg。我国只有燕山石化公司炼油厂、齐鲁石化公司炼油厂、镇海炼化公司炼油厂、福建炼油厂、济南炼油厂和林源炼油厂加工每吨原油排放废水小于 1t，仍高于兵库炼油厂排放量 100～130 倍，高于 COSMO 公司千叶炼油厂排放量 3000～4000 倍，而其他炼油厂差距更大。1997 年全国加工 1.54 亿 t 原油，与国外一般水平比较，约多排放废水 2.6 亿 t，相当于多耗新鲜水 3 亿 t。如果与国外先进水平比，约多排放废水 3.49 亿 t，相当于多耗新鲜水 4 亿 t。全国炼油厂废水排放率如果都能达到兵库炼油厂水平，一年可少排放废水 3.64 亿 t，相当于少消耗新鲜水 4 亿 t，每 t 水价格按 0.45 元计算，可以节约 1.8 亿元。

三、石油工业废气污染物

与废水及其污染物排放情况相类似，油气田大气污染物除来自油气田勘探开发生产过程外，还来自炼油化工厂排气、机械加工厂排气、自备电厂排气以及数量很大的机动车辆尾气。这些废气有的属有组织排放，有的属无组织排放；有的属高架点源污染，有的属面源污染；有的为固定源，有的为流动源。1998 年，各石油企业工业废气排放总量为 2637 亿 m^3，其中二氧化硫的排放量为 83663t；废气中烟尘的排放量为 59587t。工业废气处理率为 85.58%，燃料燃烧废气的消烟除尘率为 84.98%；生产工艺废气的净化处理率为 88.3%。天然气脱硫尾气处理率 99.85%，排放达标率 86.9%。

1. 油气田勘探开发过程中的大气污染物

油气田勘探开发生产中的大气污染物除了机动车尾气外，主要有两种：一为燃料燃烧排放的烟气，如加热炉、锅炉、柴油机燃烧烟气等；二为生产工艺废气，如井口挥发、联合站和计量站等的储罐"呼吸"以及管线泄露等，井下作业后放喷测试、天然气开采中的排污放空、事故放空的排放物，其中含大量的硫化物、烃类。

各种废气所排放的污染物，在成分和比例上有一定不同，燃料燃烧废气，主要污染物是 NO_x、SO_2、CO、烃类和烟尘；生产工艺过程废气主要是 C_1～C_4 的烃类挥发物，天然气生产中有时有硫化氢及硫醇气体排出；而机动车船尾气主要排放 CO、NO_x 和烃类，柴油机车还排放一定的烟尘。

有调查结果表明：在总烃、二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳和总悬浮物五种废气污染中，总烃排放量占 61.92%，是排放量最多的污染物。从我国油气田的能源消耗结构看，油、气、电分别占 33.7%、20.6%、31.6%，而煤只占 13.3%，即清洁能源比例高，燃煤所造成的污染物排放量相对较少。所以说，石油烃类是油气田开发生产中的特征污染物，主要通过油田无组织排放而进入大气。虽然油气集输及处理过程大多数油田采用密闭工艺流程，但仍有一定量的烃类通过储罐、管线或落地原油挥发而释放到大气中。1992～1995 年我国对油气田污染源进行了调查。根据对 13 个石油管理局 1992～1995 年污染源的调查表明，我国采油（气）和油气集输工艺的总烃损耗率约为 0.35%。

2. 石油化学工业、机械加工厂、自备电厂废气污染

石油化学工业废气指在石油及天然气加工过程中由于物料在特定条件下经过化学反应产生的含污染物质的有毒有害气体。其主要来源为炼油厂和化工厂的装置加热炉和锅炉排出的燃烧气体；生产装置产生的不凝气、弛放气和反应的副产气体等废气；轻质油品及挥发性化学药剂和溶剂在储运过程中的逸散、泄露，废水及废弃物处理和运输工程中散发的恶臭和有害气体；工厂加工物料往返输送所产生的跑、冒、滴、漏。炼油厂、机械加工厂、自备电厂，其中尤其是炼油厂所排废气，因其污染物成分复杂、毒性强、种类多、排放相对集中而危害甚大。

工艺废气。石油化工企业生产装置相对而言规模较大，特别是石油炼制装置的加工能力为百万吨级，因此工艺废气排气量较大，排放的污染物质一般在距生产装置 2000m 处可检出，例如催化裂化再生器排出的再生烟气含粉尘、一氧化碳、氮氧化物和二氧化硫。由于排放高度一般在 100m 左右，污染物扩散范围较大。根据对胜利炼油厂催化裂化装置下风向 500m 处进行测试，二氧化硫 0.15mg/m^3，氮氧化物 0.079mg/m^3，一氧化碳 0.211mg/m^3。炼油厂添加剂生产装置排放的含氯化氢气体间隙排放，排放时在距装置 200m 处空气中氯化氢浓度为 0.92mg/m^3，低于车间卫生标准，但远远超过大气卫生标准。含硫天然气的净化

过程中，硫化物（H_2S）在硫磺回收装置中绝大部分被转化成硫磺加以回收，但在硫磺回收尾气中还残留着少量硫及其化合物（H_2S、SO_2 和 CS_2）。石油炼制的一次加工和二次加工装置会产生种类很多的气体污染物，无机类污染物如含硫化合物（H_2S、SO_2、硫酸等）、含氮化合物（NO_2、NH_3、HNO_3 等）、卤化物（Cl_2、HF、HCl 等）及其他（O_3、磷化氢等）；有机类污染物如碳氢化合物（烷烃、烯烃、稠环芳烃等）、含硫化合物（硫醇类、硫醚类等）、含氮化合物（胺类、酰胺类、吲哚类等）、含氧化合物（酚、醛、酮、酸、酯等）；粉尘类污染物如燃烧烟尘、逸散催化剂等。

燃烧废气。石油化工装置的加热炉及锅炉在燃烧过程中产生大量的废气，石油化工的加热炉一般以减压渣油为燃料，渣油含硫量约在 0.2%～1.2% 范围，经燃烧后多以二氧化硫的形式排入大气，同时排出氮氧化物和粉尘。这部分废气组成相对单一，燃烧废气总排放量占废气排放总量的 60% 以上。

自备电厂废气污染物主要是因煤粉的燃烧而产生，由电厂高架源有组织地排入大气中。主要污染物为 NO_x、SO_2、CO 和烟尘。烟尘的主要成分为粉煤灰。

机械加工厂废气污染物中危害最大的是机械加工粉尘，包括：金属粉尘、燃烧烟尘和一般矿物性粉尘。

3. 恶臭污染

石油工业尤其是石油化工工业是产生恶臭污染的重点行业之一，其复杂的工艺反应，会产生大量令人厌恶、使人发生过敏反应的恶臭物质。如在石油炼制中，产生的无机及有机硫化物、氨及有机胺类、芳烃类、酚类及有机酸类等。主要恶臭污染源为无组织排放源（泄漏和面源），包括生产设备、管道、阀门的跑、冒、滴、漏，污水处理构筑物及污泥处理设施的挥发，污油罐、芳烃储罐及其他原料和产品储罐的呼吸排放等。其特点是恶臭物质种类多、浓度高、排放量少，并以无机硫（硫化氢）和有机硫（硫醇和硫醚）为主，多数为连续排放。

碱渣处理、焦化、加氢裂化和酸性水汽提、氨精制和硫磺回收装置的设备吹扫放空口、储罐呼吸口等车间集中了炼油厂的主要恶臭污染源，污染物主要是无机硫、有机硫及酚类等。根据申开莲等人对原油加工能力为 700 万 t/a 的某石化公司炼油厂的调查结果表明，焦化及精制回收车间硫化氢的臭气强度约为 4，达到污染的程度。焦化及加氢裂化车间，二甲二硫的臭气强度接近 5，达到严重污染的程度。酸性水汽提、氨精制、硫磺回收及碱渣车间的酚污染较重，臭气强度为 4 左右，达到污染的程度。碱渣装置区主要恶臭物质为有机硫、酚类及硫化氢。在装置边界区乙硫醇的臭气强度大于 5，造成严重污染；酚类臭气强度达 4 以上，地下池边硫化氢浓度最高，臭气强度为 3.3。有机胺和有机酸类化合物在装置区造成了轻度污染。酸性水汽提、氨精制装置区主要恶臭物质为有机硫、酚类、硫化氢、氨及有机胺。在酸性水汽提装置附近，乙硫醇的臭气强度为 4.4，接近严重污染。甲硫醚、酚类的臭气强度达 4 左右。氨精制装置附近，甲硫醇已超过 5 级臭气强度，硫化氢和氨接近 5 级臭气强度，已达严重污染的程度。二套常减压装置区主要恶臭物为甲硫醇、硫化氢、酚类。甲硫醇的臭气强度已超过 5 级，造成严重污染；硫化氢的臭气强度超过 3 级；酚类的臭气强度为 4，亦造成污染。加氢裂化装置区主要是有机硫、硫化氢的污染。甲硫醇的臭气强度为 6，在边界区仍为 5.8，属严重污染；硫化氢的臭气强度接近 4；酚类接近轻度污染。污水处理车间主要污染物是甲硫醇、氨、硫化氢和酚类物质，甲硫醇和氨的臭气强度为 4，达到污染的程度，可见我国炼油厂恶臭污染比较严重。

恶臭污染防治工作已经取得了许多成功的经验，如采用加氢精制技术，不仅能够提高产品质量，而且还可避免产生碱渣等污染物，同时回收硫磺和氨，从根本上消除恶臭的污染；将敞口的设施密封，将恶臭污染物集中起来，防止其向环境逸散，再将其引入恶臭处理设施进行处理。针对不同恶臭污染源和恶臭污染物的性质，国内外已开发了各种相应的防治技术，包括溶液（水）吸收、固体（活性炭）吸附、VOC催化氧化及生物脱臭等。目前，发达国家的炼油厂凭借技术和资金上的优势，一般都采用了全加氢流程，基本上解决了恶臭污染问题，但我国石化企业还没有完全解决这类污染问题。目前，随着国产原油中稠油比例增大，进口原油中中东高硫原油量增加，以及原油加工深度的提高，恶臭带来的环境污染已成为炼油企业亟待解决的环境保护难题之一。

4．石油工业废气污染的特点和危害

装置废气排放量大。石化企业装置排气量较大，例如：加工量为250万t/a的常减压蒸馏装置加热炉排出的燃烧废气为9040m^3/h，其中二氧化硫54kg/h，氮氧化物12kg/h。由于石油化工企业装置密集，占地面积大，对所在地区环境影响较严重。石油化工装置所在地区的环境均受到不同程度的影响，个别污染物浓度较高。

成分复杂，治理难度大。石油化学工业产品种类繁多，生产工艺各不相同，同一工艺又由于原料性质的差异所排放的污染物质也不相同，废气中所含污染物各种各样，性质复杂。例如炼油厂在加工原油时，原油中硫含量的不同直接影响硫磺回收装置的回收效果。化工生产装置排出的含有大量有机物的废气，由于气量小或污染物含量低难以回收和治理。化纤生产丙烯腈，这部分气体进一步治理难度大，目前一般采用高空排放的方法。表2－89是2000年中国工业企业和石油加工及炼焦业废气产生及处理情况。

表2－89　2000年中国工业企业和石油加工及炼焦业废气产生及处理情况

行业	汇总工业企业个数	废气治理设施套数	工业废气排放总量亿m^3	燃料燃烧过程中废气排放量亿m^3	经过消烟除尘的亿m^3	生产工艺过程中废气排放量亿m^3	经过净化处理的亿m^3
石油加工及炼焦业	720	1811	3915	2177	1514	1738	814
全国	70944	145534	138145	81970	74928	56032	47000

注：资料来源：2001年中国统计年鉴。

四、石油工业固体废弃物环境污染问题

油田固体废弃物通常分为有机物和无机物两种，其形态有块状、粒状、粉状和泥状。

1．油气田勘探开发中的废弃物

油气田勘探开发生产过程中排放的主要固体废弃物有：废弃钻井液、钻井岩屑、联合站原油沉降分离出来的油砂、污水处理站污泥和油罐底泥等。见表2－90。

表2－90　油气田固体废弃物来源

固体废弃物分类	主要污染物
废气钻井液	铁铬盐、磺酸盐、丙烯酰胺等
钻井岩屑	与岩屑混杂的钻井液和油分
油砂及油罐底泥	原油
污水处理站污泥	石油类、COD、微生物胶团等

2. 石油炼制产生的固体废弃物

石油炼制工业产生的固体废弃物主要来自生产工艺本身以及污水处理设施。几乎所有的生产装置都或多或少地产生固体废弃物。炼油工业产生的固体废弃物种类繁多，主要有废酸液、废碱液、废白土渣、废页岩渣、各种废催化剂以及污水处理场“三泥”等。各种固体废弃物的来源和性质见表2－91。表2－92是2000年全国工业企业和石油加工及炼焦业固体废物产生及处理利用情况。

表2－91　石油炼制废物来源和性质

废物种类	废物来源	废物性质
废酸液	电化学精制，酸洗涤，二次加工汽、煤、柴油的酸洗涤，精制轻质润滑油。酯化工段由丙烯与硫酸作用生成硫酸酯后的水解。磺化工段减压三线油，磺化反应后的废酸层。烷基化车间异丁烷与丁烯烃化法生产工业异辛烷，用硫酸作催化剂，聚合工段生产聚甲基丙烯酰胺时用硫酸作聚合催化剂	大部分废酸液为黑色粘稠的半固体，相对密度1.2～1.5，游离酸浓度40%～60%，除含油10%～30%外，还含叠化物、磺化物、脂类、胶质、沥青质、硫化物以及氮化物等
废碱液	电化学精制，碱洗涤，二次加工汽、煤、柴油的碱洗涤，精制轻质润滑油。常减压蒸馏直馏汽、煤、柴油的碱洗涤，焦化、裂化等装置二次加工汽油出装置前的预碱洗，脱硫工段干气，液态烃的碱洗 催化裂化等装置二次加工汽油用酞菁钴碱液催化氧化脱臭，烷基化车间用烃化法生产工业异辛烷碱洗	大部分废碱液为具有恶臭的稀粘液，多为次棕色和乳白色，也有灰黑色等，相对密度1～1.1，游离碱浓度1%～10%，含油10%～20%，环烷酸和酚的含量也相当高，一般在10%以上，其他有磺酸钠盐，硫化钠和高分子脂肪酸等
废白土	精制润滑的白土补充精制，石蜡和地蜡的白土脱色工段	为黑褐色的半固体废渣，含油或含蜡量在20%～30%
罐底泥	各类油品贮罐的定期清洗，生产装置各类容器清洗时的油泥和杂质	大部分为带油、杂质的黑色半固体
污水处理场“三泥”	污水处理场隔油池池底沉积的油泥，污水处理场浮选池采用投加絮凝剂和空气浮选时产生的浮渣，污水处理场暴气池剩余活性污泥	油泥相对密度1.03～1.1，含水率均为99%～99.8%，浮渣比重0.97～0.99，含水率为99.1%～99.9%，为硫酸铝等的水化物与水中乳化油的糊状物。剩余活性污泥，主要由各种微生物菌胶团组成，吸附了一定量有机物和无机物，结构散，呈絮状的棕黄色。污泥，含水率99%～99.5%
废催化剂	铂及铂—铼双金属重整催化剂及加氢用催化剂。催化裂化车间排放的废催化剂，分子筛脱蜡定期更换的废5A分子筛，分子筛精制定期更换的CaY、CuX等类废分子筛	大部分催化剂和分子筛为硅、铝氧化剂固体，废催化剂

续表

废物种类		废物来源	废物性质
添加剂渣	钡渣	生产聚异丁烯硫磷化钡盐添加剂时，经沉降和离心过滤，由成品罐分离出的钡渣	带大量产品的钡盐水溶液，经沉降和离心分离后，含产品40%，余为碳酸钡和硫化钡
	锌渣	生产二烷基二硫化磷酸锌添加剂时的过滤残渣	带43.6%石油醚抽提的锌废渣，含氧化锌30%，其余为硅藻土、硫、磷等
	酚渣	用甲苯生产对甲酚时釜底残渣	带7%～20%挥发酚的水溶液，其他含碳酸钠、硫酸钠和亚硫酸钠

表2－92　2000年全国工业企业和石油加工及炼焦业固体废物产生及处理利用情况

行　业	汇总工业企业个数	工业固体废物产生量 万t	危险废物产生量 万t	工业固体废物综合利用量 万t	工业固体废物贮存量 万t	工业固体废物处置量 万t
石油加工及炼焦业	720	895	42	591	121	166
全国	70944	81608	830	37451	28921	9152

注：资料来源：中国统计年鉴，2001。

3. 石油化工工业固体废弃物

石油化工固体废弃物由于生产过程、原料和产品差异性大，所产生的废弃物种类多，成分复杂，多数废弃物易燃、有毒、易发生反应，而且大部分都具有刺激性臭味。来源和组成见表2－93。

表2－93　石油化工工业主要固体废弃物来源及组成

装　置	名　称	排　放　点	主要组成
乙烯装置	废碱液	碱洗塔底	Na_2S Na_2CO_3 NaOH
	废黄油	碱洗塔	烃类聚合物
		加氢及反应器出口	烃类聚合物
	废催化剂	C_2、C_3加氢，烷化	Pa Ni Al_2O_3等
	干燥剂		分子筛活性氧化铝
汽油加氢	废催化剂	一段加氢 二段加氢	铁 钴
苯、甲苯	废白土 环丁砜	白土塔 溶剂再生塔	含微量烯烃和芳烃 环丁砜和烃类聚合物
乙醛	压滤机 滤饼	催化剂 压滤机	固态乙醛衍生物
醋酸	醋酸锰 残渣	回收蒸馏釜	醋酸 醋酸酯类 醋酸锰

续表

装置	名称	排放点	主要组成
环氧乙烷、乙二醇	多乙二醇 EO 反应催化剂	多乙二醇釜 反应器	多乙二醇聚合物 Ag
环氧丙烷、丙二醇	废石灰渣	石灰消化器	$CaCO_3$ $Ca(OH)_2$ 有机物
甘油	废活性炭 食盐	吸滤器 离心机	活性炭有机物 甘油
苯酚丙酮	酚丝油	丝油锅	多异丙苯 酚、苯乙酮
间甲酚	磷酸催化剂	烃化反应	磷酸及烃
	废吸附剂	吸附分离	分子筛，芳烃
	$Al(OH)_3$ 渣	异构化	$Al(OH)_3$ 水、有机物
	焦油	精馏塔	有机物
烷基苯	氟化铝	循环烷烃、氧化铝处理器	AlF_3
	氟化钙	中和池	CaF_2
	泥脚	沉降罐	烯烃、三氯化铝与苯合物

自备电厂排放的固体废弃物主要是燃煤炉渣和粉煤灰。机械加工厂所排放的固体废弃物主要为各类金属废渣。

五、石油污染

1. 石油污染的来源

工业生产（如炼油厂、钢铁厂、燃油热电厂等）产生的含油废水、水上和海上设施以及船舶在营运期间排放的含油污水或船舶事故造成的溢油和排油，是江河和海洋等水体中石油污染的主要来源。

落地原油也是石油污染的重要来源。落地原油是指在油井生产过程中，没有进入集输管线而散落在地面的原油。产生落地原油的原因主要是：自喷井在投产前由于地面集输管线尚未建成，射孔替喷时，原油进入地面土油池，有少量遗留在地面；探井试油、试采作业所产生的原油；井下作业中，压井替喷，不压井作业的跑、冒油以及起出油管，抽油杆在井场放置或清洗而散落在井场的原油；原油集输过程中，由于管理不善，管线、阀门的跑、冒、滴、漏而散落的原油；在生产过程中由于各种事故造成的落地原油，如发生井喷、管线断裂等事故，会造成大量原油流失。另外，由于不法分子的偷油等破坏行为，也会产生大量落地原油。

原油落地后与地面的水、砂、泥土混合，其中的溶解气、轻烃挥发进入大气，可污染空气。部分原油渗入土壤后，会造成土壤和地下水体的污染，由于井场土油池失修或经雨水冲刷后，落地原油随地表径流进入河流，对水体造成影响。

井喷产生的大量石油污染。井喷分为喷油和喷气。喷油是指喷出大量石油（1500～

2000t/d 或更多）同时含少量天然气（75 万 m^3/d）；喷气和油是指天然气含量在 50%以上；喷气指天然气含量达 90%～100%。按产量，井喷分为弱喷（日产量在 50 万 m^3 以内）、中喷（日产量为 50～100 万 m^3）和强喷（日产量超过 100 万 m^3）。如一次严重的海上井喷事故，喷油量可达 1 口小型井的一年产量。世界上最大一次的井喷事故是 1979 年 3 月加勒比海地区“依克斯托克”1 号井的井喷，这次井喷共溢出原油 55.6 万 t，历时八个半月，经济损失达 6.29 亿美元。美国的一次最大井喷事故在加利福尼亚州的圣巴巴拉海湾油田，流出原油达 10 万 t。1980 年的哈巴斯油田钻井平台井喷事件和 1983 年的纳络斯油田的海上井喷事件是发生于阿拉伯海湾的两次举世瞩目的井喷污染事故，前者溢出石油 5 万 bbl[1]，后者溢出石油 100 万 bbl。

地面上的天然油苗也是一种石油污染源。例如，美国南加利福尼亚的海滨某地就因此被称为“石油角”。在阿塞拜疆和俄罗斯的科米自治共和国等地的许多油田附近可以找到天然油苗。这些油苗在海和大洋表面常常表现为热喷泉，或者在河流底部或岸边以油流的形式出现。

战争也常常引起石油污染。如海湾战争中，大量原油入海，先后形成三片共约 1200km^2 的油膜，是最大的海洋石油污染事件。根据世界环境监测中心报道，原油污染给海湾生态造成严重恶果。约 100 万只水鸟丧失沿岸滩涂上的栖息地，大量鸟死亡。巴林湾的 600 头世界稀有海象，因海草污染而曾面临丧生的危险。1999 年 3 月 24 日由于北约多次轰炸南斯拉夫，使炼油厂、化肥厂、制药厂、燃料油库受到破坏，使多瑙河（欧洲第二大河，发源于德国，流经奥地利、捷克、斯洛伐克、匈牙利、南斯拉夫、罗马尼亚、保加利亚、摩尔多瓦、乌克兰等国，最后进入黑海，全长 2850km，流域面积 81.7 万 km^2）出现 20km 长的石油污染带，造成部分水生动物（主要是鱼类）死亡。另外，还造成多瑙河沉积物中苯酚以及锌、铜、铬、铅等重金属的含量迅速增加，平均超标 2 倍，锌超标 20～55 倍；罗马尼亚黑海沿岸的海滨地区也遭受空前的化学污染，海滩出现石油污染。

石油污染是海洋最普遍也是最严重的污染。陆地上的各种工矿业和各类车辆所排放的含油废气，经由大气最终沉降入海，估计全世界仅汽车发动机排出的废气每年就将 180 万 t 石油带入海中。其次，港口、码头设施石油和石油产品的泄漏、海上石油勘探、开采、运输等也是海洋油污染的重要来源。据估计，每年因人类活动进入海洋的石油约达 1000 万 t 左右，约占世界石油总产品的 5‰。

海上石油勘探、开采和运输会带来海洋石油污染。全球石油最终储量约 2954 亿 t，其中约有 1/3 为海底石油。目前世界有 70 多个国家在海上进行石油勘探，其中约 23 个国家在海上油田进行开采。海上油田开发过程中的钻井试油、井喷、事故性漏油，都会造成海上的石油污染。据不完全统计，1955～1980 年间，世界上共发生较大的海上钻井事故 131 起。平均每 1000 口油井要发生 1 次少量溢油事故，平均每 10000 口油井发生 1 次油井事故。

现在世界每年石油产量约 30 多亿 t，其中约 5 亿 t 是由海底油田生产，约 10 亿 t 自产地到消费地是通过海上运输，并且运输量以每年 4%的速度增长。日本进口的石油约有 95%是靠海运。目前，世界共有油轮 4000 多艘，其中 20 万 t 级以上超级油轮约 700 艘。这些船舶在营运期间会排放出废油和一些油性混合物，如舱底油污水、油泥、燃油舱的压舱水、油船的货油舱压舱水及洗舱水、输油管及连接部位的漏油、油船或油柜进出油管漏油等。

---

[1] 1bbl（1 标准桶）= 0.159m^3。

沿海城市的工厂，尤其是炼油厂的排放，也将大量的石油带入海中。近年来，储油设施有所发展，目前有的国家已建成高60m、直径82m、储油能力达7万t的海底油库。一旦发生事故，将给海洋带来巨大的、灾难性的污染。

在所有的海洋石油污染中，最为引人注目的是溢油污染。溢油污染是随机性突发事件，溢油有时多达几十万吨之多，危害严重。大量的石油瞬间溢散入海洋环境，可迅速扩散成很大一片面积。据估计，100bbl的油溢出24h后，可扩散成2000多英亩（$8.1km^2$）的面积。溢油主要来自船舶作业和船舶事故，特别是油船事故以及石油平台、贮油和输油设施等偶发性事故。油船事故溢油每年约40万t，占入海石油总量的10%～15%。其中约75%的事故发生于港口船舶正常作业，如装油、卸油和驳油期间，但这类事故溢油量相对较小，其中92%以上小于7t，且每年的总溢出量不到2万t。而油船的碰撞与搁浅事故所造成的溢油，量比较大，其中约有1/4都在700t以上。据统计，从1956～1980年，100t以上的溢油事故约101起；从1980～1983年，一次溢油量在100万USgal[1]以上的事故共42次。国际海事组织将一次溢油量超过100t的事故，列为重大油污事故。我国在1974～1984年期间发生的100t以上的溢油事故19起。

博斯普鲁斯海峡长29km，最窄处仅730m（在全世界30个重要海峡中，宽度最狭窄，而且气候恶劣），从17世纪以来该海峡被公认为国际航运通道，在世界石油运输中占据着重要地位。1936年，每天通过仅有四五千艘，船体小货运量少。目前，每天通过量为150艘/10分钟，货流量达1.6亿t，其中1/3为油轮，占世界产量0.5%的石油都要经过它运输。表是世界海上石油运输量增长情况。里海大油田开发，使原油以每年5000万t的速率递增，每年至少有5.1万艘油轮通过，2000多艘为远洋油轮。在过去10年间，发生过150起航运事故。最严重的是1979年11月5日，满载9.5万t原油的“独立”号油轮将原油全部倾泻入海峡，大火燃烧了两个月才被控制。载重量25万t的意大利“阿拉兹”号油轮，长1145ft[2]。这样的巨轮要停止至少要惯性前行1.69km。一旦发生泄漏或燃烧，将摧毁紧靠博斯普鲁斯海峡的整个伊斯坦布尔城。

目前海洋油污染最多的来源是油船海难事件。船舶，主要是油船，在航行途中因触礁、碰撞、搁浅和失火等意外情况而遇难，所载石油全部或一部分流入海洋。

在一般情况下，一旦油船沉入海中，油舱或油槽里的油料便通过甲板上的漏洞或裂缝源源不断地流出。第二次世界大战末期，美国海岸警备队查明有61艘油船（总载油量84万t）沉没在美国大西洋和太平洋沿岸，并不断冒出油来。另一种情况，船舶沉没后，油槽中的燃料油往往能在长时期内不漏出来，直至油槽甲板被海水腐蚀穿孔之前。如1940年4月，一艘德国巡洋舰在挪威奥斯陆峡湾沉没，到1969年才开始漏出油来。

据英国的一份调查报告指出，20世纪70年代全世界每周平均发生两起油船失事事件。油船失事造成的海上溢油事件接连不断，近30年来海上主要的油船泄油事件如下：

1972年8月21日，两艘利比里亚油轮“泰克赛尼塔”号和“奥斯维哥护卫者”号在南非海岸外相撞，10万t石油泄入海中。1972年12月19日，油轮“海星”号在阿曼湾沉没，泄油11.5万t入海。

1976年3月13日，载装25万t石油的“奥林匹克勇敢”号在法国海岸附近遭暴风雨袭

---

[1] 1USgal（1加仑（美制））=3.78541dm^3；

[2] 1ft（1英尺）=0.3048m。

击，船身裂为两半。3个月后，污染海面的浮油才得以消除。

1978年3月16日夜间，超级油轮“艾莫科·凯迪斯”号（Amoco Cadiz）在航行中舵失灵，在法国的布列塔尼海岸搁浅。这艘油轮隶属美国标准石油公司。从油轮中溢出的30万m^3原油迅速在海面上形成约29km宽130km长的石油污染带，使210多km风景如画的法国海岸遭到严重污染。直接经济损失达1.64亿美元，这还不包括死于溢油污染的1万多只海鸟及5000多t被原油污染的牡蛎。

1980年3月7日，悬挂马达加斯加船旗的“TANIO”号油轮在离法国布列塔尼亚地区海岸32n mile处搁浅。搁浅使船体断裂，其尾部下沉到海底，货油从油舱的裂缝中漏出，总量约13500t。当时正刮着7级西北风，浮油迅速地漂向法国海岸。

1983年8月5日，西班牙油轮“卡斯特罗”号在南非好望角海岸附近起火，将近10万t原油泄入海中。

1989年3月24日，“艾克森·瓦尔代兹”号油轮在阿拉斯加的威廉王子湾因船体搁浅造成泄油约4.5万t，污染了1700km的海岸。事后由科学家讨论公布了漏油事件对环境所造成的影响：约有30万至64.5万只鸟死亡，11种鸟类的数目下降；许多动物和鱼类受到了毁灭性打击，渔民损失约600万美元；漏油导致了一些鱼类的基因缺陷，太平洋鲱鱼几乎灭绝，甚至出现了双脊骨和双口腔的鲱鱼；1000多m长的海岸线由于污染而发出难闻的气味，清理石油污染的工人可能因此患上呼吸道疾病。

1993年1月5日，一艘在利比里亚注册的“布雷尔”号8.9万t级油轮在苏格兰设得兰群岛南端的加斯韦克湾波涛汹涌的海面上触礁，大量石油涌到海岸上。大片浮油带沿海岸向北延伸了约40km。2月4日，英国政府宣布禁止大型油轮通过英国沿岸海域。

1993年1月21日，一艘新加坡注册的25.5万t的油轮在从阿曼驶向日本的途中在安达曼海与另一艘空油轮相撞。这艘油轮装有近200万bbl石油，被撞裂的左舷漏出燃烧的原油，浮油带在苏门答腊群岛不远处扩散了约52km，并向印度的尼科巴群岛漂移。

1996年2月15日，在利比里亚注册的载重量为14.7万t的油轮“海上女王”号在威尔士的圣安角米尔福德港附近触礁，泄漏原油6.5万t，形成6km长的浮油带。

1996年12月29日，俄罗斯油轮“纳霍得卡”号，满载1.9万t重油从中国上海起锚，开往俄罗斯远东港口。1997年1月2日，该油轮在日本北部海域断裂。巡逻飞机发现从破坏油轮中泄出一条宽约3km、长约60km的黑色“油带”漂浮在海面上，在风力和浪头的作用下，浮油漂向日本海岸，造成日本最严重的海洋石油污染事件。1997年1月7日载着部分重油的船头漂近海岸，在著名观光胜地福井县东寻坊海面触礁，重油从撞坏的油舱中流出。1997年1月8日，日本有6个府县的300km海岸遭到浮油的污染。污染造成风景游览区和海产品重要产地的损失就将超过百亿日元。

2. 石油污染对生态环境影响

石油（原油）是气态、液态和固态的链烷烃和芳香族烃类的天然混合物。石油产品是原油的分馏产物，可分为轻质油和重质油两类。

石油和石油产品进入水域后，由于自然降解而需消耗大量的氧气。石油进入海水中的溶解氧为8mg/L（海水温度15℃，盐度35‰时海水中的饱和值），则完全氧化1kg油需41×10^4L海水中的氧，相当于$1m^2$、深为410m水柱中的氧量。被油污染的水域将会造成局部的缺氧状态，使水生植物的光合作用遭到破坏，水生动物则因缺氧而死亡，给生态系统带来严重的危害。

海洋石油污染对海洋生物的危害最严重。海水中含油（0.01～0.1）mL/L时对鱼类及水生生物就会有有害影响，在这种环境中捕捞的水产品有异味，其食用价值降低。石油与石油产品具有一定的毒性，鱼类在极微的浓度下，就会成为油臭鱼。特别是，石油和石油产品对幼鱼和鱼卵的影响更大。在受到油污染的水域中孵出的鱼苗，多数成畸形，生命力很弱，极易死亡。实验室试验表明，在含油量为0.1mg/L的海水中，孵出的鱼苗全有缺陷，只能存活122d；当含油量降为0.01mg/L时，孵出的鱼苗中畸形鱼仍高达23%～40%；而在正常的情况下，畸形鱼不会超过7%～10%。据原苏联的统计数据，里海由于遭到石油的严重污染，自1962年到1969年，海洋动物赖以为生的植物性和动物性浮游生物的产量明显下降，结果使鲟鱼的总产量下降了2/3，鲱鱼、梭子鱼等几乎绝迹。海洋的油污染也曾使英国和荷兰海岸每年约有10万只到30万只海鸟死亡。美国马萨诸塞州附近海面发生的一次溢油，曾使三天后在这一地区捕到的鱼，95%是死的。

被油污染的水域，可使沿岸一带污浊不堪，严重破坏水域周围的自然环境，使一些疗养胜地失去疗养价值。

水面的大量油膜，甚至可能引起火灾，影响水上交通。在原苏联的伊谢特河和伏尔加河河面，由于漂流着大量的石油，曾因有人不慎把燃着的烟头丢到河中去，引起两场意想不到的大火。在美国的凯霍加河，也因河面积聚很厚的油污和脏物，曾引起一场火苗高达五层楼之高的火灾，毁坏了河上两座铁路桥。

用被油污染的水灌溉农田，将会使土壤中的油类增加，油会附着于水稻植株上或渗透到植物体内，直接影响水稻的生长；另一方面，油类覆盖土壤会隔绝氧气供给，促进土壤的还原作用，使水温、地温升高，危害作物的生长发育。如黄瓜、西葫芦等蔬菜类受油污染后，叶片卷曲，植株萎缩，生长缓慢，严重时，地上茎部表皮腐烂，随后植株枯黄而死去。

3. 石油污染物的迁移转化

1）非生物降解过程

非生物降解过程包括：扩散作用、漂移、挥发作用、光氧化作用、分散作用、溶解作用、乳化作用、焦油球形成、聚集、吸附、沉降作用等。

进入海洋环境的溢油，随着时间的推移，会逐步消失，这就是海洋的自净作用。溢油消失所需的时间与油的物理、化学特性有关，也与溢油量的多少、海况及气象条件等有关。溢油的这个物理和化学变化过程，统称为风化。

溢油的最初阶段是立即开始扩大其表面积，即扩散。扩散的主要驱动力是重力。瞬时流出量大，扩散得也快。但是，扩散的初始阶段受到油的粘稠力影响，即高粘度的油，扩散得慢；低粘度的油扩散得快。随着时间的推移，表面张力（扩散）等于粘稠力时，风浪和潮水的随机运动将是油的扩散进一步推动力。

非持久性油类往往能迅速从海面消失，如汽油、煤油、石脑油和柴油，以及多数的原油和提炼后的残油都有不同的持久性。油的蒸发率主要是取决于它的挥发性，油中低沸点组分越多，蒸发也就越快；油的表面积越大，轻组分的蒸发也越快。气温越高，蒸发越快。一般地说，汽油、煤油在溢出数小时后，即能完全蒸发，从海面上消失，轻质原油在第一天能有40%的量被蒸发；重质原油和燃油，蒸发量则很少。

扩散后的油膜，在被风和海流分裂成“条”形后，在波浪和紊流的作用下，进一步被粉散成一定尺寸的油粒子。小粒子悬浮在水中，大的油滴要重新回到水面。自然弥散过程极为复杂，与油的性质和海况有很大的关系。在碎浪情况下，弥散加快；能保持流动而扩散的

油，能在较好的海况下，几天内就能完全弥散；相反，粘度高的油且能形成稳定厚油层，就不易弥散。

海上的溢油随着时间的推移都将形成乳状液。油的乳化速度取决于海况，即使粘度大的油也是如此。乳化的原因是因为油类易于吸收水分，吸水后的成为油包水的乳化液，使油类体积将增加3～4倍。低粘度的油，在风力大于3级时，在2～3h内可吸收60%～80%体积的水；粘度高的油吸收同样体积的水则需10小时。乳化液的稳定性取决于油中的沥青质的含量，沥青含量高于0.5%的油乳化液，其稳定性高，这就是通常被称为"巧克力冻"的乳化液；沥青含量低，则油的乳化液稳定性差，沥青含量低于0.5%的油乳化液，在平静的海上或漂浮至海岸时，由于日晒作用，能重新分散成油和水。

水面溢油的密度大于海水时，则沉入海底。一般来说，油本身的密度要达到海水的密度是不可能的，下沉的原因主要是油滴被固体颗粒（如沙粒）或有机物所粘附而使密度增大，从而导致油污颗粒的下沉。浅水中有丰富的悬浮物颗粒，油的沉淀要多些。而宽阔的海面，这种情况较少见，但大量的浮游动物捕食时，有可能将油粒吞进，形成粪球而沉入海底。漂至沙质海岸的油，极易与沙粒粘合，一旦冲离海岸，即会沉至海底。温度对密度的影响也是造成油滴沉降的原因。温度改变10℃，可使油的密度发生0.5%的变化，而海水只有0.25%的变化。由于这个原因，就会出现油滴在夜晚沉降于水中，到白天又因温度升高而浮于水面。

2）微生物降解作用

能氧化石油烃及相应化合物的微生物大约有200余种。大量研究数据说明，氧化速率反比于链长度。所有的气态、液态和固态碳氢化合物都会受到微生物的作用。碳氢化合物被氧化所需的温度为0～60℃，当温度低于10℃时，氧化作用的速度很慢。最适合温度是25～27℃。为了氧化1.0mg不同类型碳氢化合物，大约需要3～4mg的氧，完全氧化1L油将消耗400m^3海水中的氧。有人证明，微生物氧化石油要比石油自身氧化快10倍；几乎所有的石油都能被微生物所氧化；在适合的条件下，海洋微生物在8周内，可分解所含柴油的10%；微生物氧化轻质油比氧化重质油更快。

影响生物降解率的因素主要是营养物，尤其是氮磷化物等，以及氧气、温度、盐度等。海洋中存在200多种细菌，它们能吞食水中的石油。漂浮至岸上的油分解很慢；在海洋里，因自然降解或化学分散剂的作用，造成油滴的微细化，从而使微生物活动的表面积得以增加，这样也就加快了生物降解的过程。

试验表明，要将1mL的烃类转化为二氧化碳和水，需消耗3～4mg的溶解氧。溶解氧含量低，生物降解进程就慢，这就是为什么沉积物中的烃类降解慢，而分散油滴或光辉薄油层生物降解进程快的原因。

温度对生物降解的速率影响极其明显。因为低温将抑制细菌的生长，使微生物数量增长受到抑制。此外，液态的烃类易被生物降解，而固态的烃类生物降解难。一般，温度高时，烃类呈液态，温度低时，则呈固态。同样，由于冰中微生物数目少，其生物降解的进程较缓慢。

营养盐的浓度大，将会加快生物降解的速率，因为盐度的增加将导致微生物数量的增加。

研究还发现，氮、磷化合物的存在同样也可加快生物降解的进程。有人指出，地中海海水对伊朗原油进行生物降解的最佳含氮浓度为11mg/L，最佳的含磷浓度为2mg/L。美国的

研究人员认为，向溢油区域喷洒农用化肥，可以加快油类的降解速率。以适当比例配制的磷和氮的混合物，在喷洒后，可比未喷洒此类混合物的生物降解速率要快10倍。

3）自氧化、氧化和溶解

海洋环境中的溢油，有少量将溶于水中。溶于水中的这部分油往往是原油的轻组分，这些轻组分极易挥发。一般说来，轻组分的蒸发速率要比溶解速率快100～1000倍。烃类的溶解度一般很少大于1ppm。油的溶解速率和程度与油的分子构成、扩散程度、海水温度、水流状态及弥散度有关。

乳化油和薄膜比大块凝聚体更容易起自氧化。油的所有成分基本上都要经历自氧化作用。根据海洋环境温度的不同，石油留在海洋的时间，可由几周直到几十年。在赤道附近，一半以上的石油在一周内即可氧化。被微生物消耗掉的碳氢化合物中所含的碳，一般有1/3的烃被吸收同化构成微生物的细胞组分。有2/3被氧化成 CO_2 和 H_2O，许多中间产物是水溶性的，并且几乎完全可以被其他微生物迅速吸收。

氧化发生于油膜存在的始终，相对于风化过程的其他进程，它对油的完全消散影响甚小。在强烈的日照下，油膜分散率每天不大于1%。

总之，在溢油的初期，风化过程中的扩散、蒸发、弥散、乳化和溶解等过程最为主要，而氧化、沉淀和生物降解则是决定溢油最终去向的长期过程。

六、石油工业对当地地质环境和水土流失的影响

1. 石油开采所诱发的地质环境负效应

（1）地面沉降。大面积开采天然气、石油或地下水，地层内会出现低压（或负压）状态的空间，由于地层自身平衡受到破坏，可能会引起大面积的地面下沉，导致近地壳数公里内应力场变化，地层滑移错动，油井套管破坏，甚至油井成片错断报废，形成重大灾害。

天然气开采是靠消耗气藏自身的能量进行，随着天然气的采出，地层能量不断下降，因气藏压力下降，储积层特别是封闭性好的地层，其颗粒结构会受到周围地层的挤压而变实，发生体积被压缩，并进一步影响上覆盖层（包括表层），引起地面下沉。通常，采气引起的地面下沉程度同气藏面积、厚度及埋藏深度有关。面积、厚度越大，深度越深，储积层压得越实，地面下沉就越明显。

因气藏压力下降引起储积层被压实和地面下沉是不均匀的，因此储积层在压实过程中，有的部位会出现弯曲（垂直位移）或拉伸、挤压（水平位移），有的部位还会形成新的裂缝或突起、跨塌，这样就可能导致气井套管被拉断，地面集输设施和自然景观受破坏。如20世纪70年代末至80年代初，原苏联谢别林气田因地面下沉，一些地区出现了1.5～2.5m的陡坡，造成一些地下管道露出地面并被拉断，气井管道被扭弯并出现漏洞，导致天然气窜出地面等现象。据估计因这方面原因造成报废的油井占油井总数的15%～25%。

油气田开发地表沉降早有发生。美国威明顿油田是一个高孔隙度的多油层背斜断块油田，油田开发后没有进行早期注水，导致地表下沉。1936年油田投产后，1951年产量达到高峰值，1958年地表下沉面积波及51.8km²，下沉中心幅度达到8.85m左右。由于地表下沉，港口被海水淹没，铁道扭曲、断裂，公路桥梁产生裂缝和错动，建筑物遭损。1959年进行大规模注水，到1966年注水见到明显效果，几乎整个沉陷区已被稳住，并得以回升。

分层采油、分层注水已成为采油工艺中的重要先进技术，但采油使地表沉降预测研究几乎还是空白。应该看到，目前尚属于不毛之地的某些油田地面，今后总会有被利用的一天。从长远来看，对采气造成的地质后果应引起重视，并逐步建立预测方法，积极采取预防措

施，尽可能减少损失。

（2）诱发地震。石油、天然气的开采、废液处理和油田开发中的注水，钻井过程中的井漏也会诱发地震。诱发地震是指由于人类工程活动引起的地震，水库蓄水、盐卤、地下热（汽）的开采、矿山开采和地下核爆炸等工程活动都可诱发地震。目前油气井最深达7000～8000m，容易诱发各种地质灾害。如1972年2月8日，武昌武5井由于深井注水诱发2.2级地震，1979年华北任丘油田由于注水诱发了3.8级的地震。

（3）地下水位下降。石油天然气开采还会引起地下水位下降。平原区石油开采时一般都需要注入大量地下水。由于大量开采地下水，大庆油田区白垩系含水层中形成2000km^{2}区域地下水位下降漏斗，吉林油田采区也形成规模不等的地下水位下降漏斗，有的因止水不好造成地下水污染。

2. *石油地面建设工程引起的生态环境问题*

石油地面建设工程主要分为集输（井）站场和油气管道、油库等几大部分。油田建设井场站所、道路、输油管道、输电线路供水供电设施、工厂企业、生活基地等，扰动原地貌和地表土层，破坏地面植被。石油地面建设工程在对环境和水土保持的影响方面，有几个特点：一是影响区域不规则，根据石油分布而变化；二是影响点多面广分布零碎，特别是井场零散分布，每个点的面积并不大了；影响期主要在施工中，投入生产后不再产生新的流失。

油气管道工程是石油地面建设工程中造成水土流失最主要的因素。油气管道施工扰动，使管线及周围的土壤结构和植被遭到破坏，降低了水土保持功能。油气管道工程采用管道沟埋敷设方式，管道施工过程中开挖的松散土体以及管道上覆回填土形成软弱面，或坡角切土形成临空面使边坡失稳，易引发滑坡、崩塌、坍塌、泥石流、黄土湿陷和水土流失等地质灾害。管线施工通过山区、河道，弃渣弃土均分散堆置在坡面、河岸、河滩上，极易被水流冲刷，尤其在黄土地区。黄土地区特有的地质水文条件、土壤状况（地表组成松散、沙物质含量较高、抗冲刷能力低）、地貌特征（地质背景复杂、地形多变、梁峁沟壑纵横）以及气候条件（干旱少雨）决定了它脆弱的生态环境，在地表结构受到扰动、地表植被遭到破坏后土壤侵蚀、土地沙漠化严重，引起严重的水土流失，对土壤养分和土地肥力产生长久的破坏。如陕一甘天然气输气管道工程管道跨越黄土高原中部。从位于毛乌素沙漠边缘的陕甘宁气田净化厂为起点，以甘肃省的庆阳天然气化工厂为终点，全长354km。管道穿越沙漠、黄土梁峁及河谷川台等不同地貌区，是我国水土流失最为严重的地区，又属粗沙产区。在管道的敷设过程中，管道沿线的地表受到破坏，土体的稳定结构发生改变，致使土壤的抗蚀指数降低，土壤侵蚀加剧。同时地表土体遭破坏后，松散堆积物的径流系数减小，相应地入渗量增大，土体的凝聚力和内摩擦角减小，使土体的抗蚀性降低。因此，水土流失十分严重。管道施工使得管线两侧20m范围内的土壤可蚀性指数上升2～4倍。所以，这一地区的管道施工，水土流失所造成的经济损失比较严重。

油气田地面建设工程所涉地貌类型多，区域变异较大，需要综合运用水土保持的防治措施。目前常用的措施主要是土地整治、护坡工程、防洪排水工程、绿化工程等措施。这些措施目前在石油地面建设工程中应用较广泛，对水土保持起着较大的作用。

石油地面建设工程占用大量的土地资源，如每打一口井，少则占地5400m^{2}左右，多则占地6200m^{2}左右。尽管采取了多项措施使土地退耕还农，但至少仍占地4500m^2，对地貌和植被造成一定程度的破坏。

3. 石油天然气输送管道引起的生态环境问题

石油天然气工业的发展带动了管道工业的发展，使管道运输成为除铁路、公路、水运、航空运输以外的第五大运输体系之一。使用管道不仅可以完成石油、成品油、化工产品和水等液态物质的运输，而且可以运送如煤浆、面粉、水泥等固体物质。现在研究表明，对管道系统作改进后还可以运输非粉状固体（如邮件）。1865 年第一条输油管道在美国宾夕法尼亚州泰特斯维尔油田铺设，管径为 50mm，全长约 8km。我国最早的输气管道是 1875 年前后在四川建成，用竹子铺成，全长 100 多 km。我国的第一条长距离输油管道是在 1957 年随着克拉玛依油田的开发和独山子炼厂的扩建而诞生的。该管道全长 147km，管径 150mm。目前，全世界大型输油管总长超过 200 万 km，以每年 4～5 万 km 的速度递增。到 1989 年我国的油气管道总数是 433 条，其中原油管道 219 条，共 8155km，输气管道 214 条，共 6975.5km。目前，我国正在筹建“西气东输”大型长距离输气管道。这项工程将建设管道起自新疆塔里木的轮南地区，途经甘肃、宁夏、山西、河南、安徽、上海等 9 个省市区，全长 4167km，初期设计年输气能力 $120\times10^8m^3$，干线总投资 456 亿元。加上气田勘探开发、城市管网、工业利用等相关项目建设，工程投资规模预计高达 1200 亿元。油气长输管线已经成为输送石油及天然气的重要手段。

管线的施工对生态资源、水文地质资源环境、大气资源环境、人文资源环境等都会造成一定影响。管道工程对资源的影响包括自然资源和人文资源两大方面。对人文资源的影响主要为对古迹、遗址等文化资源以及风景旅游资源的影响。这一影响在管道的设计和施工过程中通过绕避、穿跨等方法可予以减小或消除。管道建设对自然资源显著的影响表现在生物资源、土地资源、水资源、地质环境和大气环境方面。管道敷设对生物土地资源的影响可以分为暂时性影响和长久性的影响。表现在以下两个方面：（1）敷设管道开挖沟宽为管道直径的 2.5～3 倍，沟深不小于管径加覆土厚度；施工期间由于机械碾压、人员践踏、土地翻出埋放地表，使农作物、树木和天然植被遭砍伐、被铲除，农田被掩覆，野生动物受惊吓和驱赶，其影响范围为管沟两侧各 50m。施工期间的影响为暂时性的影响；（2）管道运行期间，管道占地及其周围将产生地表温度、水分等异常的现象并对植被、野生动物的繁殖、迁徙和栖息造成长久的影响。按《石油天然气管道保护条例》，埋设管道的土地为管道企业依法征用地，永久占用，在管道中心线两侧各 5m 范围内禁种深根作物。原来连续分布的植被为管道所分割，影响生态类型的结构，在自然条件下难以恢复。表 2－94 是输油管道工程对土壤养分的影响。

表 2－94　输油管道工程对土壤养分的影响

生态类型区	有机质，%		全氮，%		磷，%		钾，%	
	A①	B②	A	B	A	B	A	B
干旱荒漠区	0.49	42	0.005	6.8	0.012	10.4	0.012	8.2
荒漠绿洲区	0.78	53.8	0.070	41.2	4.4×10^{-6}③	40.0	73	40.1
干草原区	1.09	31.1	0.069	30.5	0.002	24.4	0.037	2.0
黄土高原区	0.66	46.5	0.044	50.6	2×10^{-6}③	33.3	61×10^{-6}③	32.5
河谷平原区	0.47	42.6	0.020	27.0	6×10^{-6}③	46.0	31×10^{-6}③	26.3
黄土台塬区	0.29	36.2	0.044	47.3	0.029	13.9	0.19	9.1

续表

生态类型区	有机质,%		全氮,%		磷,%		钾,%	
平均		37.0		33.9	全磷	16.2	全钾	5.1
					速效磷	39.8	速效钾	32.9

注：摘自穆从如等：石油长输管道工程对生态环境的影响，环境科学，1995 16（2），83～87。

①是工程造成土壤养分的损失量。

②是损失量占现状含量的百分值。

③速效性养分含量。

我国目前发现的大型油气田大都位于中西部地区，这里生态环境十分脆弱，因而在建设过程中，应尽可能地降低工程损失，减少对生态环境的破坏程度。重要的是将对资源与环境损害的各种经济价值纳入到工程预算中，为后续的生态环境恢复和保护工作奠定基础。施工后，应迅速采取措施，恢复植被，保护土壤。在黄土区防止地质灾害和水土流失的发生，在干旱荒漠地区避免流沙再起，土地沙化。管道工程应尽量避开自然保护区，严禁对珍稀野生动物繁殖和栖息地的破坏，并防止捕猎和惊吓动物。施工期要避开动物孵卵和育雏期，管道明管铺于地表时要留出动物通道。

油气管道运行期间和发生事故时也会对环境产生一定影响。输气管道在运行过程中会产生一些污染物，如清管作业排放的天然气，以及天然气为燃料的燃气轮机排气及事故排放时火炬燃烧产生的烟气，清管作业中产生的氧化铁粉末及残液，首站排放少量工业废水和生活污水，压缩机产生的噪音和振动等。天然气在分离、计量时噪声为65～75 dB（A），燃气轮机运行时噪声可达80～90 dB（A）。

输油气管道工程存在一定的事故风险性，对环境和管道附近群众的生命财产安全具有潜在影响。如尼日利亚石油城瓦里市的瓦里炼油厂有一条输油管道从阿德吉村外的高速公路附近通过。1998年10月18日，由于有人凿管偷油，引来村民集体抢油而引发大火，大火包围了2000名抢油村民，近1000人被活活烧死。2000年7月11日，阿德吉村再度发生了一起震惊世界的石油管道爆炸惨案，至少有250名在现场拣油的村民当场丧生，100余人重伤，另有100人失踪。

由于管线腐蚀或施工时的焊接质量差而引起的爆管、穿孔断裂，因天然气气质及输气工艺引起的积液堵、冰堵，自然条件引起的大面积滑坡塌方、山洪冲拉断管线等原因造成大量含 H_2S 天然气的暂时释放或泄漏，将对周围环境造成不同程度的污染；而天然气属于易燃易爆气体，如果引起火灾、爆炸事故，还将危及管道附近群众的生命财产安全。四川付家庙—纳溪 ϕ720mm×8mm 的输气干线，1978年投产，从1979年8月至1980年3月，就曾因管道被硫化物腐蚀先后发生过11起爆管事故。大量数据表明，工程事故出现最多的原因是管线焊接质量不过关和清管通球不慎。所以，在管道施工过程中，保证施工焊接质量极为重要。

现今世界各国都制订有相应的管输标准。其中规定脱硫后的硫化氢含量，一般都在5mg/m^3（气）以下。严禁不合格的天然气进入远程输气管道及其下游用户，即在天然气井口必须首先进行严格地脱硫、脱碳、脱水和脱盐的工艺处理。我国和许多国家的天然气长程管输标准，都规定硫含量<5mg/m^3。

七、噪声污染

1. 石油工业企业中噪声的种类

在石油勘探开发生产过程中，其噪声源大致可分为：爆炸噪声，主要发生在地震勘探阶段；机械设备噪声，噪声源为大型柴油机、钻井泵、发电机组、电动机、高压注水泵、压气机以及水泥车、混砂车、泵车等；机动车噪声；事故噪声。

炼油化工厂的噪声大致分为：燃烧噪声，如加热炉、锅炉、火炬、焚烧炉产生的噪声；放空噪声，如气体防空、开停工放空产生的噪声；机泵设备噪声，如电机、压缩机、风机、空冷器、凉水塔、管线阀门产生的噪声等。

电厂和机械厂的噪声主要是机械设备噪声。表2－95列出了石油开发工程噪声污染的情况。

表2－95　油气田噪声污染

企业名称	噪声源分类	具体发声源	噪声值，dB（A）
石油勘探开发过程	爆炸噪声	地震勘探	110
	机械设备噪声（包括作业施工）	钻井大型柴油机	90～105
		大型钻井泵	70～85
		钻井大型柴油发电机组	80～90
		采油注水泵	90～100
		电动抽油机	70～80
		压风机、压裂车	100～110
		通风机	90～100
	机动车噪声	重点路段	80～100
	事故噪声	事故点	—
炼油厂	机械设备噪声	加热炉	100～110
		压缩机和风机	90～95
		电机	90～110
		空气冷却器	80以下
		冷水塔	40～65
		调节阀与管道	＞100
	放空噪声	放空口	＞130
	燃烧噪声	火炬	用 $L_p=K+10\lg q$ 计算
自备电厂	机械设备噪声	鼓风机等	
机械加工厂	机械设备噪声	锻冲、焊铆、车削等机械	

2. 石油工业企业噪声特点和分布

生产性噪声在石油化工企业中是一种最常见、最普遍的职业危害，接触人数多，影响比较明显。石油工业企业中生产性噪声多为强度较大的连续性稳态噪声，如电机、机泵、空气压缩机和各类风机等。另外，噪声种类齐全，如机械噪声、气流噪声和电磁噪声均有，且影响面较广；从频谱特性来分析，高、中、低频噪声均有，属于宽频噪声；产生噪声的设备多

为同时工作，噪声相互干涉，治理难度大；噪声分布广泛，影响面广。如炼油设备的生产性噪声，如立式加热炉、鼓风机、引风机、轴流风机、空气压缩机、各类油泵、电机、沥青成型机、透平机、锅炉放空、蒸汽吹扫设备、出焦工作过程等。

八、放射性污染

油气田勘探开发过程中的放射性污染主要来自放射性测井。在测井中使用的放射性物质主要有中子源、同位素等，如镅铍（^{241}Am—Be）中子源，铯（^{137}Cs）、镭（^{226}Ra）、钡（^{131}Ba）、碘（^{131}I）、锡（^{113}Sn）、铟（^{113}In）伽马源等。有密闭源和开放源两种使用方式，见表 2－96。

表 2－96　常用放射性测井源一览表

序号	源性	源名称	活度，Bq	半衰期	用　途
1	密封	^{137}Cs γ 放射源	7.4～74G（0.2～2Ci）	^{137}Cs 31 年	油水饱和度
2	密封	^{241}Am—Be 中子源	185～740G（5～20Ci）	^{241}Am 249 年	油水饱和度
3	开放型	^{131}Ba 测井微球	$25\times3.7\times10^7$ $2\times3.7\times10^7$	^{131}Ba 11.6d	注水井吸水剖面
4	开放型	^{113}Sn—^{113}In 同位素发生器	$50\times3.7\times10^7$	^{113}In 99.8min	抽油机井产液剖面
5	开放型	^{131}I	18.5×10^7	^{131}I 8.54h	油水井找漏、出水位置及窜槽工程测井

测井过程中的放射性污染主要是因操作不当造成的，如：由于操作不慎，配置的活化液溅入外环境；在开瓶分装、稀释及搅拌过程中，有^{131}I 气溶胶逸出，造成空气污染；在向注水井注入^{131}I 活化液时，由于操作不当，造成井场周围的表面污染；测井过程中沾污井管和井下工具；同位素油井“找串”后，进行反循环洗井，返洗出的同位素液体外排、污染环境；如果发生吸入事件，还会造成人体内照射危害。

在石油化工生产中，承压设备（如锅炉炉管、液化气球罐、液化气槽车、承压容器、管线等）的探伤、料位控制、液位测量、密度测定、物料剂量、化学成分分析及医疗中的透视、拍片、疾病治疗等，广泛地采用了放射技术。在料位、液面、密度、物粒剂量、化学成分分析方面的放射性同位素源的剂量、活度一般是几个 mCi[1]（毫居里），很少超过 1000mCi。不过，在正常工作情况下，不论是从事工业探伤的人员还是同位素仪表操作人员，身体健康均不会受到放射性损伤。

放射性测井工作人员遇到的射线包括 α、β、γ 和中子流。当前油田高度重视放射性测井全过程的安全问题。为保护环境，防止污染，建立了各种制度。按国家有关条例规定，设置了源库、源车、源保护筒；操作人员备有防护用具，如工作服（帽）、工作鞋、手套、口罩及其他一些用具，并配备专用餐车等。此外，现在油田已选用半衰期短、中低毒组的同位

[1] 1Ci＝3.7×10^{10}Bq。

素。如锡—铟同位素发生器中铟半衰期 99.8min，适合作为测井示踪剂使用。由于半衰期短，不会对输油管线和储油罐造成放射污染，现场使用不会造成环境的辐射危害。它又是放射性核素低毒组，化学状态稳定，同时不是气体和粉末，而是低浓度溶液，挥发性不强，这种放射性物质的有效能量低，摄入后不易对人体造成伤害。

九、石油工业中的其他污染

1. 紫外辐射

位于电磁波谱紫色光之外，波长从 160～400nm 的辐射线，叫紫外线，即紫外辐射。紫外线有自然来源（如太阳）和人工来源。凡是表面温度超过 1200℃ 的物体，都能辐射出紫外线，强度随物体温度而变化。

石油化工的炼油塔、分馏塔、反应釜、贮罐、管线、金属支架、槽车、加热炉等全部采用钢材或特殊钢材，电焊局部的温度可高达 3000℃ 以上，所产生的紫外线的波长在 290nm 左右。无论是设备改造、生产检修或抢修，还是工程的扩建、改建过程，都离不开电焊作业。这种人工的紫外线分布在石油工业生产中分布很广。

不同波段的紫外线，容易被不同皮肤层所吸收，如 290nm 的紫外线易被皮肤表层吸收。波长 297nm 的紫外线对皮肤影响能力最强，能使皮肤产生红斑、水疱和光感性皮炎等。全身症状可有头痛、乏力等。波长 250～320nm 的紫外线可引起角膜炎、结膜炎。波长 288nm 的紫外线对角膜的危害最严重。

2. 振动

物体在外力作用下，以中心位置为基准，作直线或弧线的往复运动，成为振动。人体手部接触的振动，称为局部振动。人体立位、坐位或卧位接触而传至全身的振动，称为全身振动。

在石油工业生产过程中，使用电钻、风铲、风镐等工具的操作工，大部分在维修或检修过程中会接触振动。推土机、机车、汽车等驾驶员，特别是炼油、化肥、橡胶、储运、热电等厂的厂区内，驾驶机车，振动较明显。在钻井平台、化肥、橡胶、热电等厂内的压缩机厂房、平台从事的操作工，会接触大量的振动。长期接触局部振动的人，可有头昏、失眠、心悸、乏力等不适，还有手麻、手痛、手胀、手凉、手掌多汗、遇冷后手指发白等症状，甚至工具拿不稳、吃饭掉筷子。长期全身振动，可出现脸色苍白、出汗、唾液多、恶心、呕吐、头痛、头晕、食欲不振等不适。

十、石油工业环境污染的特点

与其他行业和企业相比，油气田开发生产过程中的污染源，无论其在构成上，还是在其排放规律和环境影响上都有其特点。

1. 地域分布广阔

油气田污染源分布的广阔性主要是由油气资源的分布决定的。油气资源一般生成在陆相沉积、海相沉积和海陆过渡相中。从我国目前已开发和正在开发的大庆、胜利、辽河、新疆、长庆、中原、四川、江汉、江苏、滇黔桂等 18 个陆上油气田看，其分布遍及我国东北、西北、华北、中原、西南、华中以及东部沿海各地。开发这些油气田过程中所带来的污染，从地域上讲是比较广阔的。

2. 点源分布高度分散

油气田最基本的污染单元是地震炮孔、探井、注水井和采油井，此外，还有计量站、接转站、联合站、压气站、油库、天然气净化处理站等。它们由油、气、水管网联成一个整

体。在油田开采过程中，我国大多数油田采用行列式内部切割注水和面积注水的方式开采。行列式内部切割注水，按一定的排距和井距，在两排注水井之间布置成排的生产井。面积注水则是注水井和生产井按一定几何形状均匀分布，多选用四点法和反九点法开采。这些油田的井网密度有的为每平方千米几口井，有的则高达每平方千米几十口井，油气田井网密度有的每平方千米几口井，有的则高达每平方千米几十口井，形成高分散的点污染源和没有具体厂界的区域性污染源。如塔里木油田投入开发的轮南油田和塔中油田相距200km。

3. 面污染源分布的区域性

油气田污染源分布具有广阔性，这主要是由油气资源的分布来决定的。一个油气区通常包括许多油气田，大小不一。小的只有几平方千米，大的有几百或几千平方千米。这些油气田中连片的比较少，它们由自由众多的点源（采油井、接转站、联合站等）组成，形成没有具体厂界的区域性污染源。

4. 与地方工业污染源的交叉性

许多油田的开发建设与原有地方工业及其他行业所属企业相互交叉分布，这种相互交叉的情况，随着地方工业及其他行业所属企业的发展而日趋明显。

5. 排放方式多样化

对一个油田而言，每口井就是一个点源，由众多的油井组成的油田则为面污染源。但其污染物排放大多以点源排放为主。无组织排放和有组织排放兼有，仅就油田废气排放而言，大多以无组织形式排入环境，如大功率柴油机的烃类气体排放、井口伴生气的释放及储罐大小“呼吸”中的烃类损失等，都属难以完全避免的无组织排放源。而加热炉、蒸汽炉则属有组织排放源。

正常生产排放和事故排放兼有，以正常生产排放为主。在油气田开发生产过程中，人为因素或自然灾害（地震、暴雨、洪水、雷电等）便可导致油、气、水的泄露事故，直至火灾、爆炸等。最严重的事故是井喷和油品储存系统的冒罐、火灾、爆炸事故。因事故而造成的污染常常是严重的。在油气田，近年来由于加强了必要的预防和处理措施，事故发生的几率已很小。

连续排放与间隙排放兼有，以间隙排放为主。在油气田开发过程中，排污方式多以间隙为主。例如钻井污水、洗井污水、井下作业污水及矿区雨水等均属在施工期间的间隙性排放。

可控排放与不可控排放兼有，以可控排放为主。油田环境污染源的可控性，是油气田的一大特点，主要体现在油田采出水的可控。

6. 油气田开发过程的环境影响具有一定的时间性

有的属于暂时性的污染，如：地震噪声、作业噪声、气体临时排放噪声等，在施工和作业时产生、施工停止即消失。有的属一定时期内的污染，如钻井污水、钻井废弃岩屑、落地原油、油砂等。是在施工作业中产生的，由于作业的周期有长有短，而在作业后即停止排放，这些污染物能在环境中存在一定的时期，其对环境的影响也在一相当长时间内存在。长期性的污染，如连续排放的采出水（含油污水）、炼化污水、烃类损耗、电厂污水等，在油气田生产过程中随时产生，其影响贯穿于油气田生产的全过程。

7. 环境影响的可恢复性与不可恢复性

石油、天然气开发工程属于资源开发型建设项目，油气资源作为一种矿物资源是不可再生的。其对环境的影响除对水体、大气、土壤环境造成污染外，还表现在对地层和地表景观

的破坏以及对原自然生态环境的改变。这种对原始自然生态环境的影响有些是不可恢复和难以恢复的。

8. 环境影响的全方位性

油气田开发工程对环境的影响不仅表现在对大气环境、水体环境、土壤环境方面，还表现在对生态环境，乃至居住环境等诸多方面。油田勘探开发污染源分布广、涉及面宽，对生态影响较大。油气田勘探开发是一项包含地下、地上等多种工艺技术的系统工程。其工艺包括地质调查、勘探、钻井、测井、井下作业、采油、油气集输、储运及配套工艺过程。对生态环境的影响主要有：由于地质调查范围广阔，放炮、车辆碾压均对生态环境产生离散的、大范围的影响；钻井、测井、采油、油气集输、储运等施工环节均伴随有地面建设，大型车辆对地表的碾压，敷设管线，人群活动的践踏，均不同程度地造成地貌的破坏；油田勘探开发势必要临时性、永久性占用土地，改变了土地利用方式。

9. 由于点源分布的高度分散性和面源分布的区域性，造成治理难度大，投入高，并加重局部地区污染负荷

油气田开发工程对环境带来的影响并不全是不利影响，也有它有利的一面。如：油气田开发建设在改变原有生态环境的同时，又再造了一个兼原有生态环境与油田生态环境并存的新的人工生态系统。在这一系统中，由于合理规划和建设，较之原有环境更为适合人们的生产和生活活动，同时对当地及周边地区的社会经济发展起着极大的促进作用，有利于人类生存环境的改善。如美国长滩人工岛是美国产油最多的油田之一，但表面看起来不像是一个油田，而像是设在热带岛屿中的一组高层旅馆，通过政府和工业部门在保护环境和保证能源生产两方面的协调，使长滩人工岛成了一个优美的石油生产基地的主要范例和一个吸引游客的重要旅游点。

十一、我国石油工业面临的环保问题及国内石油企业采取的一些环保措施

1. 我国石油工业面临的主要环保问题

随着可持续发展战略的实施、人们对环保的日益关注，国家环保法规将越来越严格，执法力度逐渐加强，我国石油工业企业面临着越来越大的环保压力。许多油田企业处于环境敏感地区，如大庆油田距扎龙自然保护区、吉林油田距莫莫格自然保护区、辽河油田距双台子河口自然保护区比较近，吐哈油田处于坎儿井区，长庆油田、塔里木油田、新疆油田处于水土流失和沙漠化的生态脆弱地区，辽河、冀东、大港处于环渤海湾地区，大港油田、华北油田处于海河流域。这些油田企业，在油气开采过程中除了要实现工业污染源达标排放外，对所处的生态环境的保护问题也日益突出。污染治理投资力度不够，污染治理欠账较多，现有环保设施的处理能力和深度严重不足。废水，尤其是含油和含硫含氨废水的排放量大幅度上升，以二氧化硫、石化行业特征污染物和恶臭物质为代表的废气污染日益突出，污染物组成更加复杂，处理难度加大；目前从事滩海石油勘探开发的胜利、辽河、冀东和大港油田均没有建立海上溢油应急体系，没有配备必要的溢油应急设备。稠油污水、高含盐采油污水、钻井污水、含油污泥等处理技术目前还没有有效的解决办法，水的循环利用率较低，还有大量污水没有实现达标排放。

2. 国内外石油工业企业的一些环保措施

1）国外一些大石油企业的环保措施

随着世界经济一体化，为了增加其产品的竞争力，国内外的石油工业企业都把环保摆在了很重要的位置。通过采取各种环保措施，来降低产品成本，提高产品质量，增加产品竞争

力，关注环保也是企业承担社会责任的重要体现。

BP′Grangemouth 石化企业高度重视环保宣传教育，提高员工的环境意识，给现场操作人员每人配备便携式烃类气体泄漏检测仪。BP′Grangemouth 炼油部分 1997 年排放到空气中的碳氢化合物总量比 1990 年减少了 57%；1997 年废水中油的排放总量比 1990 年减少了 84%；1997 年的固体废弃物比 1990 年也减少了 75%。BP 集团采用更严格的环境标准，要求其遍布世界的 47 个主要生产企业的环境管理体系都得到 ISO14001 的认证，并做出各自的专项环境年报。

壳牌（Shell）公司已把可持续发展的思想融入其新世纪基本的经营理念中，把自己在 21 世纪的角色定位于为世界经济、环境和社会共同协调发展而提供能源的高效负责的、为公众所认可的供应商。Shell′ stanlow 炼厂建立了 EQUIP（环境质量改善）体系，其第一阶段在 1994 年开始实施，目标是改善排放废水的水质，减少排放废水中油含量和固体含量，预算为 3500 万英镑。开展了一项名为"Oil on the Deck"的活动，在该活动中，企业的所有环节都在努力减少油的排放，回收资源，减少污染；让全体员工都关注油泄漏问题，大家都行动起来杜绝油的溢出，炼厂为在现场操作的每一个员工都配备便携式渗漏检测仪，随时进行现场监测，严防跑冒滴漏。Stanlow 炼厂经过"Oil on the Deck"活动，1996 年废水中油的排放总量比 1992 年少排约 70%。

ELF 集团公司建立了质量、安全、环保（QSE）体系：总部与各生产企业均以 QSE 为核心制定企业的发展战略，总部重点负责进行有关法规的研究与预测，目的是使 ELF 集团的经营活动符合法国和欧洲等相关地区的法规要求；总部与各企业间每年有 4～5 次碰头会，交流信息，不断改善。ELF 炼厂所在地的法国地方政府明确规定，烟气 SO_2 的排放标准是 1400 kg/h，允许每年有 400h 的超标排放，但 ELF 炼油厂实际年超标排放时间不到 100h。法国政府规定到 2002 年油品的装卸要全部使用密闭装车设施，禁止烃类气体的挥发排放，油气要回收（炼油厂烃类气体排放占排放到大气中烃类气体的 7%）。由于 ELF 集团公司有一套运行有效的环境管理体系，因此其各项环保指标优良，表 2－97 是 ELF′Grandpuits 炼油厂的一些环保指标。

表 2－97 ELF′Grandpuits 炼油厂的环保指标

指　标	实际排放数值	法国国家标准
COD，mg/L	70	120
BOD_5，mg/L	15.5	40
SS，mg/L	25	25
含酚，mg/L	0.1	0.5
烃类气体，mL/m^3	0.5～1	5
二氧化硫，kg/h	700	1400

杜邦公司提出了对环境"零"影响的口号，目标是 2010 年营业收入的 25%将来自可再生原料，与 1990 年相比，可导致温室效应的气体的排放量将减少 65%，所用能源与 1990 年持平，并且其所用能源的 10%将来自可再生资源。

拜耳公司提出了将生态和经济结合为一个有机整体的全新的产品概念，并贯穿于产品研发、生产和销售的始末。

2）中国石油工业企业的环保措施

中国石油工业企业也日渐重视环保问题。主要表现在：

推行清洁生产。如中国石化集团重视全过程的污染防治工作，积极推行清洁生产。近年来，先后对42套生产装置进行清洁生产审核。通过对生产工艺、技术、设备和操作管理的优化、共筛选出清洁生产方案849个，实施759个。为推行清洁生产，开发出8项具有普遍应用价值的清洁生产实用技术。参加审核装置的污染物量削减了12%～30%。2000年与1999年相比，工业总产值增加，而外排污水中污染物量COD却下降了3.1%，万元产值（以1990年不变价计算）排COD下降了11%。还积极开发汽油选择性加氢脱硫、加氢脱硫异构化、柴油深度脱硫脱芳等清洁燃料生产技术，生产环境友好产品。

生产符合国家标准的产品。2000年中国石化公司一级品以上轻柴油比例达到82.70%，比1999年提高了6.8个百分点。目前国内车用汽油执行的是GB17930—1999"车用无铅汽油"国家标准，该标准已于2000年1月1日在全国范围内实施。其中标准中的硫含量和烯烃含量分两个阶段实施，第一阶段于2000年7月1日起在北京、上海和广州三大城市实施（称清洁汽油）；第二阶段将于2003年1月1日起在全国实施。我国车用汽油跨入了"高标号化"和"无铅化"行列。按该标准生产的汽油，质量明显提高，能满足Euro Ⅰ的排放要求。中国石油化工企业的环保举措制定了新的更为严格的油品质量标准，并逐步按新标准生产。

关闭严重污染环境的企业。到1999年底，全国166家炼油能力100万t以下的炼油厂，已经关停70家，取缔土炼油场点5600多个。

加强废气废物的回收利用。如到2001年12月15日，齐鲁石化公司炼油厂的火炬已全部被熄灭。至此，该厂火炬气回收率接近100%。随着生产规模的扩大，该厂曾先后树起了3支火炬，每年有数万多吨的火炬气体排放燃烧，不仅浪费了能源，还污染了环境。该厂通过火炬气回收系统，将排空的废气进行回收利用，节省了大笔燃料费用。仅熄火后的3号火炬，每小时就能回收4600m^{3}瓦斯气，一年降本增效上千万元。社会环保效益突出。中国石油天然气集团公司每年通过"三废"的综合利用，创产值达到10.1亿元，利润1.35亿元。

如在采油废水的治理方面，主要是将采油废水处理后回注地层，这样既减少了废水的排放而保护环境，又减少新鲜水的用量，达到节约资源的目的。目前采油废水的处理回注率达到93%以上。

加强天然气的开发和利用。减少排放的主要途径是使用干净燃料和提高能源利用率。作为能源，天然气具有以下特点：一是干净；二是能源效率高，如热电联产，能源效率可达70%以上，并有利于CO_2排放量的降低；三是可以直接代替车用燃料或生产高辛烷值含氧车用燃料组分，降低汽车废气污染等特点。表2－98为不同燃料燃烧所排放的SO_x和NO_x数量对比。可以看出，天然气作燃料能大大降低有害气体的排放量。

表2－98　不同燃料的SO_x和NO_x排放量（kg/t折合石油）

燃料种类	SO_x	NO_x
天然气	0	2.3～4.3
燃料油（含S 1%）	20.0	8.2
煤（含S 1%）	29.2	11.5

逐步提高水的重复利用率和发展净化水回用技术。目前，我国石油加工每 t 原油用水量高的达 $2.5m^3$，水平较好的在 $1.0\sim1.5m^3/t$ 油左右，平均水平在 $2.2m^3/t$ 油，而国外为 $0.2\sim1.0m^3/t$ 油。水的重复利用率低，目前的大约在 50%，国外石化行业水的重复利用率最高的达 98%，平均水平在 90% 左右。加工 1t 原油的废水排放量，先进工业化国家为 0.5～1.0t，我国炼油行业 1995 年为 0.72～4.34t，平均为 2.35t。尽管国内外在进行数据统计时，边界条件和指标含义可能有所不同，但差距还是明显存在。我国石油化工企业水的重复利用率计划到 2005 年达到 60%，2010 年达到 65%。

增加环保投资，加强环境管理。如中国油气田企业用于环境污染治理的投资逐年增加，到 1998 年用于污染治理设施的运行和新建污染治理设施的费用总数达到 17.3 亿元，占企业总产值的 1% 以上。

小　　结

环境问题包括环境污染和生态平衡破坏，自然界在一定限度内有自净的功能，但目前，许多污染物质的量和生态环境的破坏都超出了自然界承受的范围。环境问题涉及大气、水体和岩石圈整个生物圈，由于污染能够以物质和能量的形式在大气、水体、岩石圈（土壤、陆地）整个生物圈内迁移、扩散、转化，所以对污染问题的思考和研究应该用系统的、整体的和动态的观点和方法去进行。

思考题

（1）中国进入 WTO 后，在环境方面面临哪些压力和挑战？中国应该采取什么样的策略？

（2）污染物在气体介质、液体介质和固体介质之间是怎样迁移和转化的？

第三章　自然灾害与环境地球物理问题

自然灾害是人类遇到的重要生态环境问题。人类文明发展、进步的历史，从某种意义上说，也是人类经历、认识、抗御自然灾害的历史。自然灾害和人为的灾害对人类发展的历程有极其深刻的影响，因此，甚至有人认为："人类的历史就是一部灾难史"。中国古代传说中"女娲补天"的故事，实际上是史前人类对自然灾害现象的描述和对抗御灾害的希望。《圣经》中诺亚方舟的故事则是人类关于水灾传说最早的文字记载。《圣经》—旧约— "创世记"的第19章记载的上帝用"硫磺与火"毁灭所多玛和蛾摩拉两个城市的故事：这两个城市里"所有的居民，连同地上生产、长的"，"都毁灭了"；有人"在后边回头一看，就变成了一根盐柱"，原来的城市、平原地区"烟气上腾，如同烧窑一般"。这些应看做火山活动引发地震现象的记载。

世界历史上有许多自然灾害造成人类生命、财产损失的记录：公元79年，意大利维苏威火山毁灭了庞贝城，2万余人死难；1783年冰岛斯卡普塔火山使当地五分之一的人丧命；1968～1985年非洲连年大旱，36国受灾，饥荒死亡200多万人，饥馑严重时，每天饿死5千余人；1970年孟加拉遭遇强热带风暴，死亡30余万人。除了自然现象引起的灾害，瘟疫流行更是人类的灾难：1347年起欧洲流行鼠疫（黑死病），共约死亡7500万人，使许多城市和村庄人烟罕见；18世纪全球流行天花，平均每年死于天花者达40万人，直到20世纪中叶仍有发病者；1846～1851年爱尔兰由于饥荒和流行斑疹伤寒死亡160万人；1918年世界范围的流行性感冒使7亿人患病，2164万人死亡。20世纪以来，在人类物质文明发展进步的同时，由于生态环境破坏，自然灾害引起的灾难在加剧；另外，各种自然灾害和人为的灾难（如战争中使用各种灭绝生物的武器）又促使了生态环境的恶化。据国际红十字中心统计，20世纪70年代世界重大自然灾害的年平均次数比20世纪60年代增加了25%，20世纪80年代又比20世纪60年代增加了50%。表3-1列出了20世纪60～70年代自然灾害发生的频度。21世纪的第一年——2001年，全世界由于自然灾害共死亡3.3万人，造成经济损失1150亿美元。应该看到，在新世纪中，地球的大气圈、水圈、生物圈都会由于地球新活动期的到来以及人类活动的规模和强度增加而发生变化，随之而来的是生态环境的恶化和自然、人为灾难有可能增加，因此应对各种灾害的特点和规律进行研究。用地球物理方法和技术研究自然灾害的形成机理，对灾害的时间、地点和灾害程度进行预测，对灾害的过程实施监控则是地球物理学科的重要研究领域和应用范围。

表3-1　20世纪60～70年代自然灾害的频度

灾害类型	60年代，年平均次数	70年代，年平均次数
旱灾	5.2	9.7
水灾	15.1	22.2
热带气旋	12.1	14.5
地震	6.9	8.3
其他自然灾害	10.8	19.5

注：20世纪60年代全世界年平均发生战争4.1次，20世纪70年代年平均6.8次。

以下将就自然灾害的地球物理实质、自然灾害分类及其危害及相关的地球物理问题进行讨论，同时也对某些人为的灾害进行讨论。

第一节　自然灾害分类及灾害损失

自然灾害会使生态环境发生重要改变。与人类活动引起的生态环境变化相比，像火山和地震这样的自然灾害引起的生态环境变化更为剧烈，而像全球气候变暖这样由于自然和人为因素共同引起的生态环境变化的过程较漫长，还有的自然灾害及其对生态环境的影响难以预测。就地球物理实质而论，自然灾害实际上是地球上的物质和能量形式的转变和演化过程中的某些特例，由于这些过程的差异，对生态环境的影响和作用也不尽相同。因此，首先应该对自然灾害的种类、成灾特点及其对生态环境变化的影响和后果进行讨论。

一、自然灾害发生的时间特征分类

自然灾害可按其发生的时间特征分为：

（1）缓变自然灾害。此类自然灾害是累进性的过程，有外沿和迁移的特性，如水土流失，土地沙漠化、盐碱化，气候的长周期演变，海平面上升，地表沉降，淡水资源趋势性减少，臭氧层空洞等。这类自然灾害及其对生态环境的影响的周期可能延续几年、几十年，甚至几百年。

（2）突发性自然灾害。这类自然灾害有明显的突发性，有的有周期性，如洪水、旱灾、地震、暴风雨及冰雹、火山爆发。有的周期性不明显，如山体滑坡、泥石流、地裂、海啸、农林病虫害、森林火灾等。

二、按人类对自然灾害的认识分类

按人类对自然灾害的认识，自然灾害可分为以下几种情况：

（1）人类还没有或基本没有认识其基本规律的灾害，如地震。地震的发生与地壳运动有密切关系，而且也可能与其他天体（尤其是太阳的）的运动有关，但目前人类还不能说认识和掌握了这些规律，人类对地震这样的自然灾害还基本上不能预测，更无法控制和利用。人类对这种自然灾害基本上停留在“未知不可治”的阶段。

（2）人类已基本认识和掌握了某些自然灾害的基本规律，但还不能提出预防及控制这类自然灾害的方法或对策。例如台风，现代科学技术已经能认识和掌握其发生的主要规律（时间、地点和强度），并能对每次台风的生成地点、时间、以及运动方向和速率、强度变化、登陆地点进行预测，但是人类目前还不能对台风实行控制和利用，也还不能用科学技术手段避免。也就是说对台风一类灾害，人类还停留在“可知不可治”的阶段。

（3）人类已认识和掌握了某些自然灾害的规律，也有在科学上合理、在技术上可行治理的方案和对策，也就是说人类对这类自然灾害已基本上做到“可知又可治”。例如，如洪水，可通过兴修水库、加高堤防、整治水土流失而有效地防止其灾害或减轻灾害的损失。但也有一些减轻灾害措施由于经济或其他方面的原因，无条件实施或无条件大规模实施，或实施的效益在短时间内难以见效。例如，人工降雨能防止干旱，对可能产生冰雹的云层实施炮击，可防止雹灾。但这类作业成本过高，并非能普遍采用。再例如，建造防护林能防止水土流失和风沙危害，减少消耗臭氧层物质的生产和使用能恢复臭氧层的空洞，但从采取措施到见效的周期可能要几十年甚至几百年。

总之，自然界的规律是可以逐步认识的，因此自然灾害也是可以认识的，相当一部分自

然灾害已经能预测和防治，虽然这个过程可能要经过很长时间，例如，虽有专家认为，到21世纪30年代人类可实现对地震的预测，但也有专家认为，对地震现象的预测还很遥远。还要说明，人类对自然灾害的认识虽然在进步，但人类还不可能抗御全部自然灾害。

三、自然灾害及其造成后果的严重性

20世纪的前90年，全世界共发生较严重的自然灾害约50余次，其中地震20余次，约占40%；飓风和热带风暴14次，约占26%；火山喷发8次，约占15%；海啸和洪水8次（其中2次是由地震和飓风引起）约占15%；另外，还有几次滑坡和森林火灾（最严重的是1987年中国大兴安岭的森林大火）。20世纪的后半期的前40年，一次死亡人数在万人以上的自然灾害，全世界共发生过17次。其中1970年孟加拉的热带飓风造成的死亡人数为30万人以上！1976年中国唐山地震死亡人数近25万人！都是惊震世界的自然灾难。据1987年统计，在过去20年中，由于地震、滑坡、洪水、海啸、火山、飓风等灾害造成280万人死亡，受灾人口8.2亿人，直接经济损失250～1000亿美元。自然灾害还造成社会的动荡和人群的惊恐。进入20世纪90年代以来，全球每年发生重大自然灾害约600多起，而且由于人口的增加，气候变化，自然灾害有日益频繁的趋势。

1999年全世界共发生702起重大自然灾害，由于自然灾害而死亡的人数为52000人，造成的经济损失为800亿美元。其中造成损失最大的是：

委内瑞拉在12月中旬的暴雨及泥石流造成该国20世纪最严重的自然灾害，死亡人数超过3万人，受灾人口30多万人，经济损失上百亿美元；

土耳其地震，死亡19000人，经济损失200亿美元；

印度飓风，死亡15000人；

中国台湾地震，死亡2321人，经济损失140亿美元；

哥伦比亚地震，死亡1025人；

日本飓风，经济损失30亿美元。

其他较严重的自然灾害还有希腊的地震、美国俄克拉荷马的龙卷风、阿尔卑斯山的雪崩及岁末横扫西欧的飓风（仅法国就死亡62人）。在被保险的损失（180亿美元）中，飓风造成的损失占70%，地震占18%，洪水占6%，其他灾害占6%。

生态环境脆弱是各种自然灾害频繁发生的重要原因。在这方面发展中国家面临更为严峻的挑战：自然灾害发生的频度和受灾死亡人数、受灾人口都居高不下。表3-2中给出了20世纪后半期世界主要突发性自然灾害严重程度（按灾害引起人员死亡的多少）排序。

表3-2　1947～1980年世界突发性自然灾害

灾害类型	死亡人数	灾害类型	死亡人数
飓风、台风	499000	火山爆发	9000
地震	450000	热浪	7000
洪水	194000	雪崩	5000
龙卷风、雷暴	29000	泥石流	5000
雪崩	10000	海啸	5000

注：资料引自延军平等：《跨世纪全球环境问题及行为对策》，科学出版社，1999。

在各种自然灾害中，对人类威胁最大的是气象灾害，如暴雨洪涝、飓风、台风、龙卷风、雷暴、热浪等，所造成的人员伤亡和经济损失都居首位。其次，是地震灾害，20世纪

全球共发生7级以上地震1500余次，其中85%发生在海域，占发生次数15%的陆地地震造成的损失则占全世界地震造成的损失的85%。死于地震的人数为160万人以上，约占各种自然灾害死亡人数的一半，20世纪后50年地震造成的经济损失约2000亿美元，大约与洪水和飓风造成的损失相当。

自然灾害带来明显的生态环境变化，如火山爆发和地震引起城市的毁灭（典型的事例如意大利的庞贝被火山爆发淹灭和中国唐山因地震而毁灭）；再如火山爆发产生的尘埃引起气候的改变，洪水和火灾对公共生命线的危害——食物、饮水供应系统，房屋、道路、码头、水坝等都会对人类的生存环境产生明显的影响。应该说明，在人类社会发展的现阶段，自然灾害是不可避免的，但自然灾害造成的损失和灾难则是可以通过科学方法进行研究和预测，并可使用人类已经有的技术手段减少生命和财产的损失。

1987年44届联合国大会通过169号决议：决定将1990～2000年定名国际减灾十年（IDNDR），目标是通过对现有的自然灾害案例的研究，发展减少灾害的科学知识和技术手段，促进减灾方法的应用，到2000年，人类受灾害影响程度减少50%。减灾的重点是地震、风暴（旋风、飓风、龙卷风）、洪水、海啸、滑坡、火山爆发、森林火灾等严重的自然灾害，这些也是地球物理学关注的领域。

第二节　主要自然灾害概述

一、气候变化和水旱虫灾害

1. 长期气候变化和农业灾害

竺可桢曾系统研究了中国近5000年来的气候变化，认为约3000年前的仰韶文化时代到殷墟时代是第一个温暖时期；此后在秦汉、隋唐和元代也是温暖时期。尤其是公元五世纪末至十世纪初，即历史上的隋唐时期（公元589～907年），中国的气候温暖湿润，公元七世纪612年（隋炀帝大业八年）以后的近百年，即武则天（改国号大周）时代的久视元年（公元700年），是中国5000年以来的第三个温暖期，也是西晋（始于武帝司马炎泰始元年即公元265年）以来1700多年间最温暖的时期，其平均气温约比现在高1～2℃。这一时期，即公元630～834年（唐太宗贞观四年至文宗大和八年）又是近3000年来历时最长的多雨期。在唐代的290年（公元618～907年，高祖武德元年至哀帝四年）中，由于多雨，史籍明载水灾148次，其中降雨直接造成的水灾64次，降雨造成江河泛滥的水灾19次，降雨造成山洪暴发而形成的水灾17次。这些事例说明自然灾害与气候变化密切相关，有周期性和在某一时期的多发性。

另外，据近年文献报道，根据我国元代以后较完整的蝗灾的记载的分析统计表明，一是发生蝗灾的区域有一定规律，即在环渤海地区、环黄海地区、河北的滹沱河流域、漳河及卫河流域、黄河及运河河道区。在时间分布上有人认为有9～11年及59～63年的周期。这与太阳黑子活动及大气环流的活动周期都有关系。

2. 局部瞬时气候变异性灾害

局部瞬时性的气候变化引起的灾害主要是气旋（Cyclone，按发生地点俗称飓风或台风）和龙卷风。

（1）气旋。大气层的对流层中围绕低气压中心旋转的大范围风暴（大气流动）系统，围绕低气压中心，形成一个旋转移动、形状近于圆形的气流涡旋。在北半球气流按反时针方向

旋转，在南半球按顺时针方向旋转。气旋可在地球上任何地点发生，但主要发生在中低纬度地带。在南半球，地球表面主要是海洋，在不同经度上生成的气旋分布比较均匀，一般在南纬30°至40°间形成，顺时针旋转向东南方向移动，到南纬60°达到完成阶段。在北半球则是从赤道到北极圈都有陆地，中纬度地区形成的气旋受陆地，特别是山脉的阻挡，气旋难以形成和持续。因而北半球的气旋多生成在比陆地平坦的海洋上。发生在南北纬5°至30°之间的称为热带气旋（tropical cyclone），通常是直径为80～800km的气流旋涡，其周围的风速可达到100km/h（30m/s）～210km/h（60m/s）以上。但在热带气旋的中心，会形成一个平均直径约24 km的仅有微风，甚至无风的区域（称为“风暴眼”，“台风眼”）。由于热带气旋发生在能向大气层提供大量水汽的温暖海洋表面，因此热带气旋通常伴有暴雨。在北半球，大多数热带气旋是在7～10月份在北纬15°附近生成。在1～3月或4月，则多发生在南纬10°～15°附近的区域中。在距赤道一定距离的温暖洋面上，水汽蒸发到空中凝结为水，并放出潜热，使空气增温而进一步加强了上升气流，并在海面附近形成低气压区，随这一过程的继续和加强，低气压区变成低压中心，上升气流逐渐形成按一定方向移动的气流涡旋，最后形成热带气旋。热带气旋登陆后，由于失去水汽的补给，其强度很快减弱，变成低气压后消失。热带气旋很少在海洋上消亡，即使经过热带海洋中的小岛，其强度也会大为减弱。气旋从开始形成到消亡可持续几天到十几天，并带来巨大灾害。通常在大西洋和加勒比海上生成的热带旋称为飓风，在西太平洋及南中国海海域生成的称为台风，在澳大利亚西部生成的称为畏来风（willy－willy）。据1949～1990年的统计，在西太平洋地区（东经105°～180°，北纬0°～55°区域内），共出现过1182个台风，平均每年28个。每年最多的是40个（1967年），最少的是20个（1951年）。1949～1990年共有290个台风在我国登陆，平均每年有7个台风在沿海登陆，最多的达12个（1971年），最少的有3个（1951年）。1997年有3个，1998年有4个台风登陆，均是20世纪以来台风灾害较少的年份。台风在我国登陆的时间多在7月、8月、9月三个月（占台风登陆次数的75%）。登陆地区多在浙江省以南的沿海各省（占89%），登陆点最北的纬度是北纬40°。

热带气旋和台风由于风速高而有明显的破坏作用。风速（记为 v ）越大，迎风面上单位面积承受的压力（风压，记为 p ）越大。风压 p 与风速 v 的关系为：

$$p = kv \times 2$$

式中　k ——与空气密度有关的阻力系数，$k = 0.1240$。

计算表明，当风速为30m/s时，风压为100kg/m²，风速为50m/s时，风压达300kg/m²。在台风中心附近最大风速甚至可达100～110m/s（如1958年5月21日在关岛附近洋面上生成的台风——代号Ida，中心附近风速达110m/s）。1831年在西印度群岛的巴巴多斯（Barbados），台风过后，气象人员发现一块重68kg的铅块被吹离原地548m，另一块重182kg的铅块则被风带出512m。

在纬度较高的地区，同一水平面上温度梯度大的区域（称为锋区，温度梯度最大的面称为锋面），冷暖空气交界面产生波动时，气流逐渐旋转，使波动形成的气流扰动中心的气压下降，最后形成气旋式环流，并在较大范围内产生风暴。由于这种气旋多在温度分布较均匀的温带产生因此叫温带气旋（extropical cyclone）或波动气旋（wave cyclone）。温带气旋的风力不如热带气旋猛烈，通常风速为100km/h（30m/s），但气旋的范围（直径）往往可达1000～4000km 。温带气旋在运动过程中，来自高纬度的冷空气不断沿气旋的外侧侵入，并取代暖空气，当气旋完全由冷气团组成时，温带气旋趋于消亡。从观测点看来，温带气旋的

前锋是暖湿气团，可见云层变厚变低，然后出现降水，降水要持续到气旋中心移过观测点，气旋的后锋面是冷锋，在其经过观测点时，还有短时间的降水。温带天气变化与温带气旋有关，往往是在特定的区域沿典型的路径移动，并影响这些区域的天气变化。

与气旋相反的是围绕高气压中心旋转的反气旋，在发生气旋的区域都可能产生反气旋。反气旋的运动规律与气旋相反，在北半球，反气旋是沿顺时针方向由中心向外呈螺旋形旋转；在南半球，则是沿逆时针方向由内向外旋转。反气旋一般不如气旋强烈，而且也不带来降水，因此其造成的灾害也较轻。

（2）龙卷风。龙卷风是一种猛烈的小尺度天气现象，龙卷风的形成与雷暴云中的上升气流有关。在雷雨或大雷雨后，地面潮湿，空中干燥，地面与空中风向不同，以至产生气流旋转，在雷雨云下面形成一个直径为几米至几百米（平均为200m）的气旋，呈漏斗状，并快速移动，这就是龙卷风。从其形成到结束时间多为几分钟至几十分钟，移动距离多为几百米到几乃至几十千米，其最大风速可达100m/s以上，气流上升速度可达60m/s。发生在陆地上的龙卷风称为陆龙卷（俗称“地龙”），出现在海面的称为水龙卷。按龙卷风的风速及强度可分为6级，其中：

F0级，风速为33m/s（117km/h），相当于12级台风；

F1级，风速为33～55m/s（117～180km/h），相当于12～15级台风；

F2级，风速56～70m/s（181～253km/h）；

F3级，风速71～93m/s（254～332km/h）；

F4级，风速94～117m/s（333～419km/h）；

F5级，风速118～143m/s（420km/h），称为“无可估量”的（Incredible），所到之处，片瓦无存。

美国是世界上龙卷风危害最烈的国家，每年春夏之交，由北方阿拉斯加南下的冷空气与墨西哥湾北进的暖湿气流在美国东部平原交汇（俄克拉荷马州是龙卷风发生最频繁的区域，有全球龙卷风故乡之称），对流的气团产生旋转，形成涡旋，继而形成龙卷风，其接地行进时间有长达9h的记录。1974年148股龙卷风袭击美国东部，所到之处，房屋倒塌，公路破坏、桥梁断裂，其中俄克拉荷马州两天内，有几十股龙卷风袭击扫荡，造成严重损失。据20世纪后半期统计，美国每发生一次龙卷风平均死亡约1人，直接经济损失10万美元。

美国因龙卷风灾害严重，因此有专门的研究机构及较完善的气象雷达预警系统，与20年前相比，预警时间提前10min，即可在龙卷风发生前约15min发出警报，赢得了相当的救生机会。我国由于龙卷风灾害远小于其他自然灾害，因此对龙卷风的观测和预报属于空白：既无先进的观测设备，也无资料。灾害发生后也缺乏快速的反应机制。

3. 雷暴

雷暴或雷电是地球上分布范围宽（遍及N82°至S55°之间），出现频率高（全球每年约有31.5亿次闪电，每秒约有100次雷电），受害范围广（人、畜、建筑物、输电线路及高架、航空器、森林以及无线电通讯等均可受害），发生突然的一种自然灾害。

雷电是积雨云强烈发展阶段，当云层带电，而且云层之间、云地之间、云层与周围空气间的电位差增大到一定程度时发生放电现象。雷电通常伴随大风、暴雨、冰雹、龙卷风，是一种局部性、但却是猛烈的灾害性天气。雷电发生时，放电的持续时间在秒级以下，危害突然，表现特殊。雷电有神奇甚至迷信色彩，伊斯兰教的《古兰经》认为，霹雷是“真主对赛莫德人不端行为的刑罚”；美洲人认为雷电是“神火”；中国古代有“雷公电母”的神话，对

人遭雷击触电死亡则用"火龙抽筋"来解释。

在听到雷声前看到的闪电，常见的是枝状，即像树干上向各方向蜿蜒的分枝。其次是在降雨结束前，看不到闪电的枝形结构，只见一片闪光的片状闪电。在强雷暴天气发生时，在枝形闪电后，天空有时出现一个直径几厘米至几米的火球，火球可在天空随气流移动，也可接地放电，这就是球状闪电。还有一种少见的链状闪电，像一排发光的球呈链状排在天空。

雷电发生时，放电云团间电位差可达5000万V，由于放电时间短至千分之一到十几分之一秒，在放电通道上，在几微秒的时间内，温度可升高到2～3万℃，是太阳表面温度的3倍左右，因此可能对人类生存环境发生影响和危害。

据统计，美国每年约有数千人受雷电击伤，近400人死亡；每年因雷电着火的房屋约25000幢，每年经济损失约20亿美元。我国每年因雷电伤亡者达万人以上；仅山东临沂地区1950～1972年因雷电伤亡者就达900余人，1991年江苏省在梅雨期因雷电死亡者38人。据估计，全国每年因雷电造成的经济损失约1亿元。

除雷电致人死亡的案例时有报道以外，雷电的另一危害是引起建筑物火灾。在我国历史上因雷电烧毁重要建筑物的事例并不少见。例如，明孝宗弘治十二年（1499年）山东曲阜孔庙遭雷击，烧毁大成门、大成殿、东西两庑共123间；清雍正二年（1724年）六月初九日申时，孔庙再次遭雷击，烧毁大成殿，东西两庑及御碑亭被毁。清光绪十五年（1889年）秋，北京天坛祈年殿被雷击起火烧毁。1979年3月30日，湖北省武当山金顶遭雷击起火，同时有6名道士重伤。

由于雷电多在空中发生，因此对航空器也构成威胁。当飞机穿越或接近积雨云（也称雷暴云）时，容易导致闪电或遭雷击。据国际民航组织统计，平均每2930飞行小时有一次雷电事故。据美国空军统计，1976～1980年共有278架次飞机遭雷击，平均每年55架次，每次雷击事故损失平均损失20万美元。每100次飞机雷击事故中就有一次机毁人亡（主要是油箱爆炸起火所致）。1979年5月9日，伊朗空军的一架波音—747型飞机在飞行中遭闪电袭击，闪电从座舱顶部进入飞机，在闪电移动到副油箱时引起爆炸，导致机毁人亡。1988年9月9日11时30分，一架越南民航班机，在泰国曼谷廊曼机场上空准备降落时，突遭雷击，飞机在机场附近坠毁，机上81人，73人死亡，2人失踪，仅4人生还。我国尚未报道过民航飞机遭雷击机毁人亡的事故，但夏秋季飞机误点多与雷电天气有关。

雷电对宇航飞行的威胁、造成事故的案例如：1987年3月26日，美国载有军事通讯卫星的Heracles（大力神）火箭发射时遇倾盆暴雨，升空后1分钟遭雷击爆炸，损失1.7亿美元。1987年6月9日晚7时在美国卡拉维拉尔角航天中心发射场上，三枚竖在发射架上待发射的火箭被雷击中，引爆了发射装置火箭自行升空，是为世界航天史上的罕见事故。

雷电还会损坏电力系统：雷电可沿输电线路传播，使沿线电压强烈波动引起事故。据美国电力研究所估计，美国每年发生的断电事故是由于雷电，每年用于恢复供电和修复损毁的费用约5500万美元。另一类是雷击供电设备造成损坏，1992年9月16日11时45分，一声炸雷打在广州黄埔碧山电站附近的10000V高压线上，击碎11号电杆的瓷瓶，使高压线短路，在附近的煤气厂的压缩机停止工作，13万m^3的煤气无法输出，广州8万管道煤气用户断气约4小时。

雷电对油库、建筑物和施工设备也是威胁。1989年6月、7月、8月三个月，在锦西、秦皇岛和黄岛油库发生油罐因雷电感应自爆，尤其是在黄岛（在青岛附近）油库，罐区损失数千万元。1992年6月22日晚8时，在北京的中央气象台的钢筋混凝土办公大楼遭雷击，

闪电进入钢筋结构，产生强达几千伏的感应电压使大型计算机与小型机网络突然中断，6条国内线路和1条国际线路中断，还有一些计算机终端、微机串行接口等设备受损，计算机系统工作中断46小时。1992年8月27日17时，深圳盐田九径口某运输公司开山工程现场，部分洞室已经装添炸药，因雷击，强电流沿灌进洞的雨水引着了导火线，使炸药爆炸，当场死亡9人，失踪6人。

4．暴雨和洪涝

暴雨洪涝是自古以来对人类威胁最大的自然灾害，根据联合国救灾协作局的统计，在15种自然灾害中，由于暴雨洪涝造成的财产损失和人员伤亡居首位。就地球上的陆地区域而论，由暴雨引起的洪涝在大部分地区都可发生，其中南亚的印度、孟加拉、巴基斯坦，南太平洋西岸的中国、日本、菲律宾，北美的美国是世界是暴雨洪涝灾害最频繁的国家。例如，印度全国有2420万 hm^2 土地经常受洪涝灾害，其中25％～50％的地区每年都受洪涝灾害。美国的密西西比河流域平均每2～3年发生一次水灾，每6年左右发生一次较大洪水；1927年密西西比河下游洪水的洪峰流量达 $70800m^3/s$，造成堤防溃决，淹没面积 $52000km^2$。世界气象组织（WNO）的公报指出，从1967～1985年的19年中，有110个国家发生过800次形成灾害的暴雨洪涝。暴雨洪涝发生的范围广、频率高是其他自然灾害所不能比的。暴雨洪涝的另外一个特点是造成的灾害严重。世界气象组织的统计结果表明，1967～1985年世界部分国家每年死亡于暴雨洪涝灾害的人数在2万以上。1991年4月底，孟加拉国南部沿海遭受暴风雨和洪涝灾害，死亡12.9万人。日本近30年来由于暴雨洪涝造成的财产损失每年约2500亿日元，占国民总收入的1％以上。在内陆地区，由于暴雨洪涝还会诱发泥石流、滑坡、山崩等次生灾害，还会衍生瘟疫、饥馑等灾害。1931年我国长江流域16省672县遭受水灾，被洪水淹死者40万人，而在暴雨洪涝诱发的瘟疫、饥馑只又有几百万人死亡。1943～1944年孟加拉地区遭受暴雨洪涝，致使水稻绝收，加上当时日本侵略军占据缅甸，切断了从缅甸进口大米的通道，以致该区在两年内饿死300～400万人！

二、地质灾害

地质灾害也是自然灾害，其中主要的如地震、山体滑坡、雪崩、泥石流等。此外，人类活动、人为因素也能引起地质灾害，如采矿区崩塌滑坡、采空塌陷、矿渣等采矿废弃物造成的泥石流等。还有一些地质灾害的成因既有自然原因，也有人为因素，例如煤田火灾。在各类地质灾害中危害最严重的是地震。

1．地震

在各种自然灾害中，地震以灾害的突发性及难以预测，造成伤亡人数多，建筑物损坏严重，次生灾害的多发性，震后恢复正常生活的长期性，给人类留下沉重的、灾难的回忆。同时，也没有另外一种自然现象会像地震一样，带着雷霆万钧的轰鸣，伴随着色彩斑斓、出现神秘的地光，以及继之而来的山崩地裂、刹那间天旋地转，或飞沙走石，或排天海浪，这样一种显示大自然威严的景象，给人以极为深刻的印象。但时至今日，甚至在今后相当长的时期内，作为一种严重地质灾害的破坏性地震，仍然是一种难以预测的自然现象。

天然地震就其成因可分为（天然的）构造地震、火山地震、崩塌地震、陨石地震等类型。其中由于地壳的断裂、褶皱等构造运动产生的构造地震占天然地震的多数。由于人类活动引起的地震有水库地震和核爆炸地震等。

对地震的定义实际上有多种理解，但一般来说至少涉及四个方面：能量释放、岩体破裂、地震波、破坏作用。地震涉及地球内部的能量释放，但不是所有的地球能量释放都与地

震有关。如地磁能的释放（极光）并不引起地震；热能的释放（火山爆发）也不一定都引起地震，即使是与地震关系最密切的机械能释放，也只是在释放过程时间极短，并产生能引起破坏作用的地震波时，才发生地震。

地震的破坏作用主要是指地震波对地面建筑物的破坏。发生在人口稠密地区的强烈地震及其伴生的火灾等会造成生命、财产的巨大损失，并可能在地震发生后由于人类生存条件恶化（水源、食物供应中断，居住环境破坏，通讯中断）而造成瘟疫等次生灾害。还可能由于人类的错误行为（抢劫、偷盗）形成人为的灾害。历史上的大地震都以其突发性、巨大的破坏性和恢复正常生活的长期性，给人以深刻的印象。

与地震有关的术语和概念是：震源、震中、极震区。

地下发生地震的地方叫震源；震源在地表的投影叫震中。实际上震源不是一个点，因此其在地表的投影也是一个区域。在此区域附近，地表破坏最严重的区域叫极震区。将震源及震中都看成一个点，则震源到震中的距离叫震源深度 h 。通常震源深度 h 小于 60km 的地震叫浅源地震；震源深度 h 在 300km 以上的叫深源地震；震源深度在 70km 左右的叫中源地震。对人类危害最大的是浅源大地震。

（1）地震震级。

地震的危害程度由地震释放的能量来表示，而地震释放的能量可由地震台网记录到的面波的幅度来评估，并据此规定地震的震级。由面波幅度评估的地震震级叫里氏震级（由 C.F. Richter 于 1935 年提出），记为 M_s 。里氏震级 M_s 与地震台网记录到的地震面波的振幅 A 、周期 T 、震源与地震台网的距离（震中距）H 有关，即

里氏震级 $M_s = \lg A/T + f(h, H) + C_s$

式中　A ——面波振幅，ms；

T ——面波周期，s；

h ——震源深度，km；

C_s ——与地震台网记录仪器有关的常数；

H ——震中距，km；

$F(h, H)$ ——与震源深度 h 及震中距 H 有关的函数。

当震中距 Δ 大于 600km 时，周期为 20 秒时能记录到面波的最大振幅，此时里氏震级的计算可简化为：

$$M_s = \lg A + \text{常数}$$

若记录的是体波的振幅 At，则可计算体波震级 m_b ：

$$m_b = \lg A_t/T + Q(h, H) + C_s$$

式中 $Q(h, H)$ ——与震源深度 h 和震中距 H 有关的函数。

里氏震级 M_s 和面波震级 m_b 间可按下式换算：

$$m_b = 2.5 + 0.6M_s$$

（2）震级和能量。

里氏震级 M_s 与其释放的能量 B 间的关系为：

$$\lg B = 11.8 + 1.5M_s$$

式中　B ——震级为 M_s 时，所释放的能量，J（焦耳）。

按地震震级及释放能量的多少，天然地震又可分为：

M_s <3 时为小地震，无感；

3≤ M_s ≤4.5 时为有感地震，2000～3000tTNT 爆炸相当于 M_s =4 级地震；

4.5< M_s <6 时为中强地震，20000～30000tTNT 爆炸相当于 M_s =5 级地震；

6≤ M_s <7 时为强地震，20～30 万 tTNT 爆炸相当与 M_s =6 级地震；

7≤ M_s <8 时为大地震；

M_s ≥8 时为巨大地震。

地球每年发生人类无感觉的 M_s =3.4 级以下地震约 80 万次（里氏震级 M_s =3.4 级地震释放的能量为 9×10^6J），能对地面建筑物产生破坏作用的 4.9 级以上地震为 1400 余次。20 世纪全世界平均每年发生 7 级以上地震 18 次，20 世纪共发生过 8 级以上地震 11 次。在 1897～1977 年的 81 年间，全世界发生过 M_s >7.75 级的地震 139 次；其中 1900～1952 年发生过 M_s >8.5 级的地震 4 次，M_s >7.75 级的地震平均每年发生 2.1 次。1953～1977 年 M_s >7.75 级的地震平均每年发生 1.2 次，M_s >8 级的地震平均每年发生 0.5～1 次；世界上用仪器记录到的最大地震是 1960 年 5 月 22 日发生在智利的 M_s =8.9 级地震，此后一天半以内，又陆续发生 M_s >8 级余震 3 次，另外两次余震的震级也大于 7 级。全世界有 35 个国家是受地震的严重威胁。表 3－3 列出了 20 世纪全世界死亡人数最多的次地震。

表 3－3　20 世纪全世界死亡人数最多的次地震

时间，年．月．日	地　　点	M_s，里氏震级	死亡人数，万人
1906.8.16	智利瓦尔帕莱索	8.6	2
1920.12.16	中国宁夏	8.6	10
1923.9.1	日本横滨	8.3	20
1939.1.24	智利奇廉	8.3	2.8
1939.12.26	土耳其东部	7.9	3.3
1970.5.31	秘鲁北部	7.7	7
1976.7.28	中国唐山	7.8	24
1978.9.16	伊朗东北部	7.7	2.5
1985.9.15	墨西哥中部	8.1	0.95
1990.6.21	伊朗西北部	7.3～7.7	5

（3）地震烈度。

地震烈度是按地震对地面的破坏程度来划分的。地震烈度的划分除了考虑地震的震级外，还要考虑震源深度、震中距等地震地质条件有关，同时还要考虑对建筑物的破坏程度和人的感觉。我国在 1980 年编制的《中国地震烈度表（1980）》，将地震烈度分为 12 个等级。表 3－4 为成灾的地震烈度及灾害分级。

表 3－4　地震灾害规模及地震烈度

震级及危害	轻度灾害	中等灾害	重　　灾	特大灾害
里氏震级 M_s	4.7～5.5	5.5～6.5	7	>7
地震烈度	Ⅵ～Ⅶ	Ⅷ～Ⅸ	Ⅹ	>Ⅺ

续表

震级及危害	轻度灾害	中等灾害	重灾	特大灾害
受灾范围	几十平方千米	几百～几千平方千米	几万平方千米	几万平方千米
埋压人数	数百	几百～几千	几万	几十万～百万
死亡人数	几～几十	几十～几百	几千～上万	几万～几十万
重伤人数	几十	几百	几千～上万	几万～几十万
房屋损失	10%	10%～30%	30%～70%	80%以上
恢复时间	几天	几个月	近一年	几年
实　　例	1976年7月 唐山地震北京 的灾害程度	1976年7月 唐山地震天津 的灾害程度	1966年3月 河北邢台地震 $M_s=6.2\sim7.3$	1976年7月 唐山地震 $M_s=7.9$

（4）中国的地震活动和灾害。

我国地处欧亚大陆板块东南部，在欧亚大陆板块和太平洋板块、菲律宾板块的交汇处，受环太平洋地震带及喜马拉雅地震带的影响，因此地震活跃区范围广（基本烈度定为7度以上地区面积达312万km^2，占国土面积的32.5%，其中包括全国299个大城市中的136个），地震活动频度高、强度大、震源浅（多为70km以内），是地震灾害严重的国家。

我国又是地震记录比较完全的国家：宋朝编辑的《太平御览》记录了距今约4200年前、公元前23世纪，五帝中帝舜时发生的地震。战国时期成书的《竹书纪年》记载了夏朝帝发（夏桀的父亲）七年（约公元前1731年）泰山发生的地震。从公元前16世纪的夏桀五十二年到清光绪二十二年（公元1896年）的3363年间，共有3322次有感地震记录。其中公元138年2月28日（东汉永和三年二月乙亥）在洛阳用张衡研制的候风地动仪记录到700km以外的甘肃金城（今兰州）发生的6¾级地震。这是人类历史上第一次用测震仪器记录到破坏性地震。从公元1303年（元大德七年）到20世纪末全国共发生过20次8级以上地震（有8次发生在20世纪）。其中1556年1月23日（明嘉靖三十四年十二月十二日）发生在陕西华县的8级地震，据记载："秦晋之交，地忽震，延及千里，川原坼裂，郊墟迁移，或壅外岗阜，或陷作沟渠。军民被害，其奏报有名者八十三万有奇"（《明史·五行志》），一次灾难死亡83万人，是人类有史以来自然灾害造成的最大惨剧。1920年12月16日，宁夏海原发生8.5级地震，死亡人数达23.4万人，有震感的范围远达上海、北京、汕头、香港，甚至在越南海防的摆钟也因此停摆，是中国历史上地震波及面最大的一次。也就是从这次地震开始，中国才有了现代意义上的地震观测和研究。

20世纪中国因地震死亡人数近60万人，是全世界同期地震死亡人数的42%。新中国建国以来因地震死亡的人数为27.6万人，占同期因自然灾害死亡人数的54%，直接经济损失421亿元，占同期自然灾害经济损失的6%。据对1900年以来20世纪中国发生的7级以上地震的统计，有53%发生在中国西部（东经107.5°以西，从北向南大体在宁夏的银川—陕西的宝鸡—重庆的涪陵—贵州的独山以西），39%发生在台湾和南海地区，在中国东部（东经107.5°以东）发生的频度仅8%。2000年前后我国发生7级以上地震概率较高的地区是天山南部地震带、澜沧江—湄公河地震带、祁连山地震带、台湾地震带。我国大陆东部发生6级以上地震的高概率区为河套地震带、长江下游—南黄海地震带、张家口—渤海湾地震带。从总体上说，随1999年9月21日台湾发生7.6级地震（还有两次震级为7.2级、7.0级的

余震，共有7级以上地震3次），可认为由1988年开始的20世纪中国最后一个活跃期基本结束，发生7级以上地震的概率减小，但不排除有发生6级左右地震的可能。

2. 滑坡

斜坡上的岩石、土壤块体在重力的作用下沿软弱面整体向下滑动的地质现象称为滑坡（俗称"走山"、"跨山"）。滑坡多发生在地形起伏大、断层发育和多暴雨的地区。世界上几乎每个国家都有滑坡发生，诱发的原因为：暴雨、冰雪融化、地震、火山及人类活动。滑坡造成巨大灾难的案例是1987年的厄瓜多尔的瑞文他多山山坡经过一个多月的暴雨后，发生一次6.9级地震，引起山体滑坡，造成1000余人死亡，4000余人失踪，由于滑坡破坏了穿越厄瓜多尔的输油管道（该国的经济命脉！），经济损失达15亿美元。同是1987年7月10日四川华蓥市因暴雨使溪口镇附近约100万 m^3 山岩滑坡，使293人被滑坡引起的泥石流淹没。这一地区的滑坡早有预兆，并在一年前（1986年）就提出过治理方案，但由于当地企业不愿出资，1000万元的治理费用无法落实，因此酿成大祸！

3. 泥石流

在山区沟谷中，由于暴雨、冰雪融化等水源诱发的含有大量泥沙、石块的特殊洪流叫泥石流或泥流（mudflow）。泥石流实际上是含有大量悬浮颗粒（大小不等）和粉砂的水流，与一般水流相比，泥石流有大得多的密度和粘滞性，因此在其流动过程中，先是体积或重量最大的岩石块体（最大的有房子大小）先沉积下来，然后其余部分继续流动，沿山坡流动时，速度可达100km/h，有巨大的破坏作用。由于泥石流的粘滞性很高，因此不可能流得像水流一样远，在流动一定距离后陆续发生沉积，所产生的沉积物由粉砂、巨砾、岩屑和被挟裹的有机物组成，泥石流形成的沉积物边界明显，外缘多呈叶缘状，高度可达3～6m。

4. 地面塌陷

地面塌陷发生在地下为石灰岩溶洞、暗河发育区的地表，或是在采矿区内，没有及时回填的采空区，或是在年久失修的地下坑道（如"深挖洞"时期修建的人防工事）的地表。在这些地下有空洞区域的顶部，由于承受不了地面压力而发生的陷落。

5. 地面沉降

地面沉降是在一定的地表面积内发生的地面海拔标高降低的现象。地面沉降的自然原因是地壳构造运动、近地表处第四纪沉积物的天然固结等自然因素所致；人为的原因则是由于地下水长期过量开采或油气田开发引起地表水平高程的降低；另外自然和人为因素的共同作用，如日地关系的变化和人类大量使用燃料产生的温室效应而导致的海平面上升。在人口密集的沿海大城市，由于地下水的大量开采和大规模城市建设，人为因素逐渐成了地面沉降的主要原因。这种地壳的垂直变形虽然不一定立即引起灾害，但可能是潜在的灾害根源：地表沉降可能造成地下的水、煤气等管道的破裂，建筑物地基下沉，还可能引起海水倒灌，因而使土壤盐碱化。1898年在日本的新泻就发现地面下沉；1921年我国的上海发现地面沉降；1995年美国的50个州都发现大城市附近地面沉降。由于地面沉降问题的普遍性和对人类生活安定的威胁，联合国教科文组织从1960年到2000年已经召开过6届研究地面沉降的国际会议。

6. 煤田火灾

出露在地表或在地下的煤层和空气中的氧接触，发生氧化作用，所产生的热积累（由于通风不畅等原因）到一定程度，达到煤的燃点，就会发生自燃，美国的科罗拉多和蒙大那的煤田都有多年自燃的记录。

7. 火山爆发

火山的定义是：在地球（或其他行星、卫星）的表壳上，排出熔岩、火成碎屑物质及喷气的任何出口。火山可分为裂隙式和中心式两种类型，其中多见的是裂隙式，这种火山沿地壳断裂分布，可延伸几千米，熔岩多为玄武岩质，从地壳的裂隙中连续地喷出，形成火山岩平原或高原，在海底的裂隙中喷发则形成枕状熔岩。中心式火山则是由竖直的几何形状相对简单的熔岩管喷出熔岩，并在地表形成锥状山体。全世界有百余座近百年来还在喷发的著名火山。1863 年印度尼西亚的喀拉喀托火山爆发，其中爆发最强烈的一次在 4670km 外地听到声音，火山爆发及伴随而来的海啸使爪哇和苏门达腊等地的 36000 余人死亡，是人类有史以来的最大灾难之一。在意大利，除了曾经淹没庞贝城的维苏威火山以外，埃特纳火山是欧洲最高的火山，海拔 3233m，约有 200 余次有记载的喷发；1536 年的喷发使 1000 余人丧生，1669 年的喷发则使 2 万人丧生；1998 年 7 月 23 日再次喷发，火山口浓烟柱高达万米。从 1992 年 8 月到 2002 年 1 月，全世界有近 20 次大的火山喷发，其中尼加拉瓜的塞罗内格罗火山曾经在 1992 年和 1995 年两次爆发，每次都有上千公顷良田被毁，其中 1995 年 11 月 19 日的爆发使 2500hm^2 遭火山灰侵袭，4500 余人生命受到威胁。2002 年 1 月 17 日在非洲刚果（金）的戈马市以北的尼拉贡戈火山爆发，熔岩将戈马市区大部分掩盖，至少死亡 45 人，50 万人逃离家园到卢旺达避难。

8. 人为地质灾害

据不完全统计全国每年因采矿引起的塌陷近 200 处，塌陷坑 1600 多个，直接经济损失 4 亿多元，此外每年还要直接破坏和侵占土地 200km^2。由于盲目开采矿产而造成地质灾害的最明显事例是在长江三峡的链子崖，链子崖是一个断层，江北右侧山体未发现煤层，整个体岩层多年保持稳定。而江南左侧山体有薄煤层，由于长期掠夺性开采（经济效益仅十几万元），采空区未回填，因此山体出现裂缝，而且整个山体向北移动，一旦出现滑坡，将使这一段宽度仅约百米江段发生碍航，初步估计经济损失将达 8～9 亿元。国家为此专门成立了“长江三峡链子崖和黄腊石地质灾害防治指挥部”，其中链子崖危岩治理已历时 6 年，经费投入数千万元。可惜的是乡镇企业对资源、生态环境破坏已到如此程度，但决策层对此不仅没有深入反思，而且还在为乡镇企业辩护！

还有一种潜在的地质灾害则完全是由于工作失误造成的，其中一例是长江三峡移民工程中的巴东县新县城的选址问题：新县城的大部分又建在地质滑坡体上，已有一定规模的新县城又面临再次搬迁问题。除了在巴东县境内的焦家湾大桥，因施工质量问题垮塌成为 1999 年的新闻热点外，另一座神龙溪大桥桥墩高 104m，为中国第一、世界第四，在施工中发现第 3 号桥墩的下面有地质断裂带！工程前期不进行工区的地质评价，所造成的恶果，可见一斑。

第三节　我国的自然灾害

我国是自然灾害频繁的国家，也是自然灾害造成的损失最大的国家之一。中国历史上的灾害记录之多，世界罕见。从公元前 18 世纪到公元 20 世纪，几乎无年不灾。对上古时代各种自然灾害传说的记录见《淮南子》：“往古之时，四极废，九州裂；天不兼复，地不周载，火烂炎而不灭，水浩洋而不息”。说的是地震和水旱灾害。《汉书》曰：“尧、禹有九年之水，汤有七年之旱”。大禹治水的故事是反映中华民族抗洪救灾的精神和企望。我国发生最频繁

的是水旱灾害。在近2100多年中我国共发生过1600余次洪灾，而且发生洪水灾害的频率在加快：三国时期，约每十年一次，北宋时期约两年一次，元、明、清时期，几乎每年都有水灾。其次是包括地震在内的各种地质灾害。前已述及，中国是地震记录比较完全的国家，而且是地震灾害严重的国家。

我国不仅灾害频繁，而且成灾严重。除了前已述及的地震灾害外，北宋徽宗政和七年（公元1117年）黄河决口，死亡100多万人；清光绪三年至四年（1877～1878年）中国北部旱灾、饥荒死亡950万人；清光绪十三年（1887年）黄河和长江大洪水死亡210万人；1896年上海风暴潮死亡10万人；1915年珠江洪水死亡10万人。1928～1930年陕西大旱死亡250万人；1931年黄河大洪水死亡370万人；1942～1943年河南旱灾、饥荒死亡300万人；1943年广东台山大旱死亡15万余人。在大灾后由于瘟疫流行，其死亡人数甚至超过原发灾害。例如西晋咸宁（武帝司马炎）元年（275年），河南洛阳瘟疫死亡10万余人；元太宗四年（1232年）河南开封瘟疫死亡90万人；清乾隆三十六年（1771年）新疆伊宁瘟疫死亡30万人；1925年四川70余县大旱后瘟疫死亡10万人；1967年全国流行性脑炎爆发，死亡16万余人。

新中国建国以来，每年因一般性的自然灾害（每年都有，发生地点不同的水旱灾，农作物病虫灾害等）造成的经济损失，平均每年约400亿元（到20世纪80年代，估计每年约为500多亿元），20世纪末每年因自然灾害造成的经济损失约1000亿元，每年因灾害死亡1.2万人。而突发性的恶性自然灾害的损失就更为严重。1976年唐山地震，仅唐山地区就死亡近25万人，直接经济损失近55亿元，这次地震波及14个省市，近4亿人口，经济损失近百亿元。1998年仅长江及松花江、嫩江洪水造成的直接经济损失就达2000亿元。我国一般灾年，农作物受灾面积约6～7亿亩，为播种面积的1/3，成灾面积约3亿亩，因受灾减产粮食约200亿kg。每年因各种自然灾害而倒塌的房屋约300万间。人类有史以来共发生过死亡5万人以上的地震17次，其中7次发生在中国；死亡人数超过20万人的地震全世界有史以来共发生过4次，其中三次发生在中国。1998年中国大陆未发生发生7级及7级以上的地震灾害，但5级及5级以上的地震34次（大陆30次，台湾及南海4次）；6级及6级以上地震10次（大陆9次，台湾1次）及滑坡等各种地质灾害造成3285人伤亡及失踪（其中1573人死亡），直接经济损失上百亿元。我国自然灾害的特点是：

一、各种自然灾害种类齐全

我国地域辽阔，地质、气候条件复杂多样，有形成各种自然灾害的条件。以地质条件而论，我国东部位于太平洋板块和亚洲板块接合部，南部是印度洋板块和欧亚板块接合部，是新生代以来地壳运动强烈的区域，尤其是由于板块间的碰撞，属于地震活动的高发区。从地形、地貌方面来看，我国70%的国土为山区，地形条件比平原地区复杂，有形成滑坡、泥石流等灾害的环境和条件。从气候条件来说，我国从南到北跨越赤道带、热带、亚热带、暖温带、温带、寒温带等6个热量区，从东向西又形成湿润带、半湿润带、半干旱带、干旱带等4个不同的水气区域，由于东亚季风的影响，雨量集中在夏季，各种不同的地质和气候条件的组合使我国可能发生多种自然灾害。我国每年都可能发生的自然灾害有：

1. 地震

1900年到1994年共发生过1921次5级以上地震，平均每年20余次。其中1900年到1984年发生里氏（M_s）6级以上地震648次，其中M_s＝7～7.9级地震95次，M_s＝8级以上地震9次。另据统计，20世纪全世界共发生M_s＞7级地震约1500余次，其中约有

10%发生在中国境内。其中全世界发生的陆地地震约有33%发生在中国的大陆和台湾，占世界陆地地震次数的33%，释放的能量约占世界上地震释放能量的35%，这些数据表明，中国是地震活动频度高，尤其是强震次数多的国家。20世纪全球共发生过$M_s>8.5$级以上的地震3次（1920年12月16日，中国宁夏海原8.6级地震；1950年8月15日中国西藏察隅8.6级地震；1960年5月22日，智利南方省8.5级地震），其中2次发生在中国。中国发生地震的区域广泛。史料记载，全国各省都发生过5级以上地震，除了浙江和贵州外其余各省都发生过6级以上地震。按中国地震烈度表的统计，地震基本烈度定为Ⅶ度以上的地区面积为312km²，占国土面积的32.5%。全国299个大中城市，有136个城市（这些城市的人口占全国城市人口的一半）的地震基本烈度在Ⅶ度以上。全国61个人口在50万人的大城市中有33个的地震基本烈度在Ⅶ度以上。我国地震发生的又一个特点是震源浅，除了在东北与俄罗斯交界处发生过的地震有震源深度为400km的记录外，其余地震震源深度多在30km以内，1999年发生在台湾的几次7级以上地震的震源深度甚至仅1km左右，因此对地表的破坏性和危险性大。综上所述，我国天然地震的特点是“次数多，分布广，震源浅”，是世界上地震灾害严重的国家。

2. 滑坡

我国沿太行山经秦岭、鄂西、重庆、四川、云南到藏东是滑坡灾害的多发区。以长江流域为例，约3/4的滑坡发生在上游。如金沙江流域面积为长江流域总面积的27%，但滑坡数目（626个）占长江全流域滑坡总数的36%，滑坡的土石方量（68亿m³）则占全流域总量的50%。滑坡多发生在夏季多雨季节。如1996年5月31日～6月3日，云南元阳县老金山连续两次滑坡，造成200多人死亡。在非雨季，也有发生滑坡的记录，如1965年11月23日云南禄劝县发生特大滑坡，滑动总土石方量为3.9亿m³，滑坡体移动5～6km，在金沙江支流普福河谷中形成一条长1100 m、高167m的大坝。这次滑坡造成444人死亡（一说是651人死亡），是建国以来最大的滑坡灾害之一。2001年5月1日位于乌江边的重庆市武隆县县城巷口镇附近发生山体滑坡，1.2万m³土石在几十秒钟内滚滚落下，摧毁一幢9层住宅楼，死亡74人。在滑坡事故发生前，4月30日武隆县境内下了一整天雨，雨水的浸泡，是使山体岩层滑动，产生滑坡的重要原因。

3. 泥石流

我国的泥石流活动区集中分布在青藏高原与次一级高原或盆地间的过渡带上以及青藏高原与东部丘陵、平原的过度带上。在这两个过渡带上，泥石流活动区又集中分布在断裂发育的河流沟谷两侧。在这些区域，泥石流又集中在板岩、片岩、片麻岩、千枚岩等变质岩岩系发育的地区和泥岩、页岩、泥灰岩、煤层等强度低的岩系发育和第四纪堆积物发育的区域。

泥石流的分布还与降雨、冰雪融化有关。泥石流经常发生在干湿季节明显，局部暴雨强度大的区域。另外地震会加剧泥石流的活动，西藏察隅地震、河北邢台地震、唐山地震后，周围山区都出现泥石流活动高潮。

在西藏的波密古乡沟的冰川泥石流，由于爆发猛烈、活动频繁、发育典型被认为是“冰川泥石流之王”。该沟自1953年复活后，连续活动30多年，每年夏季和秋季泥石流活动频频发生。有观测记录的是：1962年32次，1963年70余次，1964年85次，1965年11次。除西藏外，全国其他地区还有泥石流沟1万多条，其中长江流域就有6800多条，多在宜昌以西的长江上游，其中嘉陵江和金沙江流域占2/3以上。仅重庆和四川省就有受滑坡、泥石流、崩塌危害及威胁的城镇120个。1989年7月10日四川华蓥市溪口镇发生泥石流滑坡，

全镇有293人在瞬间被泥石流淹没。1981年7月9日在成昆铁路利子伊达站附近发生泥石流，历时一小时，流速10m/s，流量2000m³/s，冲人大渡河的固体物质数十万立方米，将正好路过的442次列车上的两节机车、一节邮政车、一节客车冲进大渡河，使275人死于非命。奔腾而下的泥石流冲出山口后，几分钟就将宽120m、最深处达13m的大渡河截断，使之断流4h之久。

铁路是受泥石流危害最严重的行业部门，铁路沿线有泥石流沟1386条，威胁约3000km运营线路的安全。川藏公路全长2400km，沿线有泥石流沟上千条，几乎有1/3的路段受泥石流的威胁。每年雨季，铁路和公路受泥石流和山体滑坡而中断的报道频繁。国家每年用于治理能源企业和交通运输干线滑坡、泥石流危害的投资达几亿元。

4. 地面塌陷

我国80%的地面塌陷灾害发生在采矿区，以煤矿开发为重要产业的山西省则是地面塌陷的多发区：1997年大同市发生塌陷37处；1998年娄烦县发生大面积地面塌陷，损坏窑洞90多孔；1999年山西省商业管理干部学校操场发生陷落，47名学生陷进坑内，其中3人死亡。2000年1月28日煤都抚顺市区地面塌陷，产生一个东西长约60m，南北宽约40m，最深处15m的大坑。据不完全统计，我国因采煤而造成的地面塌陷已经超过40万hm^2，而且每年还要增加约2万hm^2。全国每年因地面塌陷的直接经济损失在4亿元以上。

5. 地面沉降

全国第二次水准复测结果表明，占我国国土面积的3/4地表呈沉降趋势，多数地区的地表沉降幅度在80 mm以下。从整体上说，华中、华东、华南地区的地壳下降幅度较大，约为80mm。长期过量的开采地下水是地表沉降的主要原因。长江三角洲地区由于长期过量开采地下水，已在苏州、无锡、常州间形成面积为5500km^2、深度为40～50m的漏斗形无水区。和20世纪50年代初相比，苏州地表累计下沉1.2m，无锡累计下沉1.1m，常州下沉1.0mm。地表下沉幅度最大的地区是临近长江三角洲的浙江的杭嘉湖平原，无水漏斗区的面积达2000km^2，最大下降幅度达200mm，宁波平原年平均沉降1cm，嘉兴在近40年沉降81.4cm。由于地面沉降，苏州的平门大桥的净空降低，每到汛期，较大船舶难以通过。1994年苏州发生洪水，但水位不及1954年有史以来的最大洪水，但由于地面沉降，受灾面积反而比1954年扩大了几十平方千米。

位于陕西关中平原的古城西安，由于地下水位持续下降，城市地面沉降区域面积已达158km^2，其中地面沉降幅度超过500mm的区域甚至达48km^2，有1300年历史的大雁塔沉降了1198mm并向西倾斜886mm，全市出现了11条明显的地裂缝，总长度达76.68km。

地面沉降已经是天津市的重要自然灾害。1992年9月1日塘沽新港海域潮位达5.93m，由于地面沉降，塘沽的地面海拔标高损失了3m，致使港口、码头、客运站被淹，损失3亿元。天津郊区的大港油田从1965年开发以来，由于大量开采第四纪地下水对深部油层进行注水开发，使地下水位下降了80m，油田地区地面沉降808mm，沉降中心达1700mm。除了使油田的采油和供水管网变形、破裂外，还使油田的生活区污水外溢，汛期洪水排放不畅。1959～1993年天津市由于地面沉降的直接经济损失达172亿元，间接损失则达1724亿元。

华北地区以济南为中心形成一个沉降区，济南的基岩下沉约90mm。同时由于地下水位降低，著名泉城的许多名泉，如趵突泉已经经常停喷。近年来地壳下沉最明显的地区在新疆的克拉玛依地区，10年间克拉玛依地区平均下沉150mm以上，最大下沉量达200mm，受以克拉玛依为中心的漏斗形下沉的影响，乌鲁木齐的基岩下沉约160mm。克拉玛依地区的地

壳下沉是否与油田长期开发有关尚待研究。地面沉降对沿海大城市的威胁是严重的，据专家估算，若上海市地面沉降1mm，其直接经济损失达1000万元。

6. 煤田火灾

我国是世界上煤田火灾最严重的国家。煤田火灾面积累计达720km²，已经燃烧的优质煤炭达42亿t以上。目前（2001年初）还在燃烧的煤田面积17～20km²，每年损失煤炭资源1000万t。山西的大同在明朝就有煤层自燃的记载。新疆是我国、也是世界上煤田火灾最严重的地区。新疆的煤层倾角大，在地表经常有露头出现，日照充足又干燥少雨。地下采空区通风不畅，一旦发生自燃，往往持续多年。天山南麓因煤层出露地表，自燃后附近土壤和地表岩石温度升高，土壤和岩石中的铁质变成红色的氧化物。这也就是《西游记》中的火焰山。

7. 洪水

短期内过量的降雨使河水漫过天然或人工堤坝形成灾害性洪水，我国的长江和黄河以及淮河流域汛期降雨量集中，容易形成洪水。从公元前206～公元1949的2155年间，有记载的较大洪水共1092次，平均每两年发生一次洪水。从公元前180年到公元1949年，我国发生过有记载、死亡万人以上的洪水64次。其中公元1117年（金太祖时期）河北沧州一带的发生洪水，死亡人数达100万人！1923年我国南方湖北等12省水灾，死亡30万人。

新中国建国以来兴建了相当规模的水利工程，但受洪水灾害的面积仍达73.8万km²，占国土面积的7.7%。1950年到1985年每年平均受洪灾面积达1.19亿亩，成灾面积0.66亿亩。每年因洪水造成的经济损失及用于抗洪救灾的经费都在百亿元以上。1975年江淮洪水直接经济损失100亿元，1985年辽河洪水经济损失47亿元，1998年长江及松花江、嫩江洪水经济损失约2000亿元。

8. 飓风、热带风暴、风暴潮、沙尘暴等灾难性气候

我国每年平均有7个台风（热带气旋或热带风暴）在沿海登陆，时间集中在7～9月，并以8月最多。除热带风暴（或台风）本身造成的损失外，若热带风暴登陆之日在农历初三、十八日大潮汛附近，将会使暴风雨借大潮的水位危及沿海的农田、盐场及居民的生命。我国的江浙沿海是风暴潮危害最严重的地区，从1301年（元成宗大德五年）到1905年（清光绪三十一年）共发生过死亡人数在万人以上的风暴潮10次（均发生在农历初一及十五日前后）。其中最大的一次发生在1691年6月29日（清康熙三十五年六月初一日），其时“飓风大作，潮夹风威”，冲人长江人海口附近崇明、嘉定、川沙、柘林等地数百里，“半夜时水涌丈余，房屋树木俱倒，村宅什物顷刻漂没”，淹死十万余人。在江浙地区每次造成人员死亡万人以上的特大风暴潮每百年发生约2次，死亡百人以上的大风暴潮约20余年一次。在干旱地区则是沙尘暴肆虐，例如1985年4月23～26日，甘肃的金川市连续4天遭8级大风袭击，6000亩农作物全部被风沙打死或埋没。另外农作物成熟季节的干热风还会造成谷物籽粒干瘪，产量下降。

9. 龙卷风

我国早在东汉时期就有发生“谷雨”的记录，即农田中的谷物被龙卷风刮起，在其他地方伴随雨水从天而降。国外还有“青蛙雨”、“金币雨”等奇观的记录。我国的龙卷风多发生在春夏之交的东南沿海。由于东南沿海地区平原面积不大，难于形成规模大、强度高的龙卷风。新中国建国后最早的龙卷风记录是1956年9月24日，在上海黄埔江畔，110t重的大油罐被卷起后，抛到120m开外处，使一栋三层楼倒塌。1958年7月6日，山东滕县龙卷风肆

虐，接地行进9km，造成63人死亡，700多亩农田的作物被毁。近几十年来，我国最大的龙卷风发生在1969年8月，地点是河北的霸县，龙卷风以73km/h的速度东移，在移动过程中，袭击了褚河港村，造成861人死亡的惨剧。这场风灾还使天津市死亡120余人。近年较大的龙卷风记录是：

1995年4月19日，广东番禺发生龙卷风历时1h20min，20多个村庄受灾，死亡6人，受伤233人。2120间瓦房被揭顶，毁坏高压电线杆280根，翻船、沉船63艘，经济损失1.26亿元。

1998年4月23日，湖北公安县遭遇12级龙卷风袭击，45min横扫55km，200多个村庄的11000多间房屋倒塌，27人死亡，2000多头大牲畜死亡，40多万亩农作物倒伏，经济损失2.2亿元，相当于该县一年的财政收入。

1999年3月19日，广东茂名市遭遇龙卷风袭击，停留在澳内海童子湾内的235艘渔船因涨潮而上浮，龙卷风袭击使71艘沉没，其余164艘受到不同伤害，所幸无人员伤亡，经济损失70.5万元。

1999年5月15日，广东遂溪县发生龙卷风，在20min内（风力最大的时间约5min），造成12人死亡，51人受伤，损坏房屋465间，其中144间完全倒塌，经济损失330万元。

10．干旱缺水

我国是水资源短缺的国家，尤其是我国北方，缺水成为制约经济发展的重要因素。全国200多个城市缺水，其中40多个城市严重缺水。20世纪80年代中，每年由于缺水所造成的经济损失约200亿元。仅辽宁省每年因缺水的工业生产损失就达34亿元。一些城市由于超采地下水，地表出现大面积漏斗形沉降，如北京及华北地区。有些城市（如西安）则由于地下水长期超采使地表出现7条裂缝，危及附近约2000幢房屋。全国农村约有1.8亿人口居住地区人畜饮水困难。由于华北及西北地区降雨量分配不均，例如华北春季降雨量占全年的11%，夏季占70%，秋季占16%，冬季占20%。因此在春播季节由于降雨量稀少，出现春旱，部分地区还出现夏季的伏旱（“卡脖子旱”），每年有上亿亩农田因干旱成灾。“水灾一条线，旱灾一大片”，干旱是比洪涝灾害更为严重的自然灾害。全国由于自然灾害造成的经济损失中，旱灾约占60%，涝灾占30%。1975～1986年旱涝灾害面积累计49562万 hm^2，减产粮食4400亿kg。有研究资料表明，按我国1949～1988年期间各省、市、自治区耕地多年平均受旱面积和1980年耕地面积的比值，可定出各省、市自治区的受旱程度。

表3-5　我国各省、市、自治区受旱程度统计

省、市、区名	1949～1988年平均受旱面积，万 hm^2	1980年耕地面积万 hm^2	受旱程度，%	省、市、区名	1949～1988年平均受旱面积万 hm^2	1980年耕地面积万 hm^2	受旱程度，%
山　西	127.9	392.1	32.6	贵　州	33.1	190.4	17.4
山　东	234.2	724.1	32.3	江　西	40.1	253.3	15.8
河　南	225.2	712.8	31.6	甘　肃	53.1	355.4	14.9
河　北	202.4	664.8	30.4	福　建	18.5	129.1	14.4
湖　南	97.1	342.5	28.3	广　东	45.4	315.2	14.2
安　徽	122.2	444.6	27.5	宁　夏	12.3	89.6	13.8

续表

省、市、区名	1949～1988年平均受旱面积，万 hm²	1980年耕地面积万 hm²	受旱程度，%	省、市、区名	1949～1988年平均受旱面积，万 hm²	1980年耕地面积万 hm²	受旱程度，%
湖　北	101	373.9	27.0	江　苏	61	464.1	13.1
陕　西	90.1	381.5	23.6	云　南	34.3	283.8	12.1
广　西	52.6	263.7	20.0	西　藏	2.7	22.9	12.0
内蒙古	100.7	525.3	19.2	黑龙江	105	872.6	12.0
四　川	1247	660.4	18.9	青　海	6.9	58.7	11.8
辽　宁	66.8	376	17.8	浙　江	18.9	182.3	10.4
吉　林	70.8	404.4	17.5	新　疆	15	318.2	4.7

注：资料引自孙荣强：中国农业重旱区及其特征，灾害学，1993，18（2）

从表3－5可见，若按受旱程度大于25%为重旱区，则山西、山东、河南、河北、湖南、安徽、湖北七省为重旱区。

据1937年出版的《中国救荒史》统计，我国从公元前18世纪到20世纪40年代，共发生过5258次严重自然灾害，其中水旱灾害约占40%（表3－6）。

表3－6　我国公元前18世纪到20世纪40年代自然灾害频数表　单位：次（%）

时　间	水灾	旱灾	蝗灾	雹灾	风灾	瘟疫	地震	霜雪	饥馑	总计
公元前18世纪至20世纪40年代	1058 (0.20)	1074 (0.20)	482 (0.09)	550 (0.11)	518 (0.10)	261 (0.05)	705 (0.13)	203 (0.04)	407 (0.08)	5258 (1.0)
其中，20世纪1940年以前	1	19	10	6	8	7	13	3	4	101

注：资料摘引自张鸿祺等：灾难医学，中国协和医科大学，北京医科大学联合出版社，1993。

11．病虫鼠害

20世纪80年代末以来我国每年农作物病虫鼠害的发生面积为28～30亿亩，每年因病虫鼠害使粮食减产10%～12%。农作物的主要病虫害是：（1）小麦赤霉病。长江中下游产麦区经常发生，常年损失收成1～2成，每5～6年大流行一次，减产4成。（2）小麦吸浆虫。每年约有3000万亩受灾。（3）小麦蚜虫。每年发生面积近亿亩。（4）水稻白叶枯病及褐稻虱。（5）棉花枯萎病和黄萎病。（6）蝗灾。20世纪后期，每年受灾面积约1400万亩，"九五"期间全国发生飞蝗面积累计达0.8亿 hm²（1.2亿亩），2000年有12个省市区的160个县发生蝗灾，受灾面积达200万 hm²（3000万亩）。蝗灾是和生态环境变化关系更为密切的一种灾害。近年来，我国蝗虫发生呈现加重的趋势（尤其是北方），原因是多方面的，其中由于连年干旱，造成河滩裸露、湖泊水库脱水，有利于蝗虫的滋生；一些地区退耕还湖、还林、还草等都提供了蝗虫的适生条件；20世纪90年代末，哈萨克斯坦等国的蝗虫迁入我国，增加了虫源。（7）鼠害。全国约有鼠40亿只，危害约8亿亩农田和近1亿亩草场并危及森林，每年损失粮食250亿kg，牧草1500亿kg，相当于500万头牲畜的饲草量。森林的病虫害每年发生的面积占全国人工林面积的1/4，每年因林木病虫害损失林地500万亩，减少木材量1000万 m³。主要的森林病虫害是：松毛虫，榆树紫金花虫，泡桐丛株病，杨树的黄斑星天牛等病虫害，松材线虫病。森林病虫害的损失已超过森林火灾。城市中的虫害主要

是白蚁。我国南方木质建筑经常被白蚁蛀害，如四川泸州建筑物有近40%被白蚁危害，武汉市建筑物有14%遭白蚁蛀，湖北省每年因房屋受白蚁蛀害损失达5000万元。

12. 森林火灾

1950～1984年，全国共发生森林火灾55万起，烧毁山林约5亿亩，其中成灾面积1.8亿亩，相当于1949年以后全国人工造林保存面积的43%。每年平均烧毁森林面积100万hm^2，火灾发生率为0.8%，高于发达国家的平均水平。1987年5月6日～6月2日发生的大兴安岭森林火灾是新中国建国以来毁林面积最大，损失最重的一次。大火波及1个县城，三个镇，火灾中死亡193人，火灾波及林区面积101万hm^2，毁林70万hm^2，烧毁林木3230万m^3，烧毁房屋61万m^2，烧毁原木85万m^2，受灾人口5万余人。为扑灭火灾出动人力58000人，汽车1300多辆，飞机96架，使用灭火弹21万发。经济损失为近70亿元。

13. 高温（热浪）

夏季高温影响工业生产并导致高温区居民因中暑的死亡率升高。1988年7月高温使全国工业产值减少124亿元，其中仅江苏就减产28亿元。高温区的上海、南京、南昌、合肥等4个城市因中暑死亡者超过500人。另外高温季节使大城市缺水的矛盾更为突出。

14. 低温冰雪霜冻

我国农作物及畜牧业几乎每年都会因低温、冰雪、霜冻而成灾。一般年份，我国北方油菜苗因冻害死苗15%，重灾年达50%。秋季低温会使大秋作物减产，春季严寒会冻死越冬作物及牧草，并可能形成灾害。1989年2～3月，青海春雪成灾，冻死成畜45万头，甘肃省则有21万头牲畜死亡。有资料表明，我国每年因地温、冰雪、霜冻造成的经济损失约5～10亿元。另外，冰雪还可能使陆路交通及航空运输受到影响。1984年1月18日苏南大雪，使该区90%的长途汽车停运。1990年春节，天津大雪，天津医院仅一天就收治滑倒摔伤成骨折的患者70余人。

15. 酸雨

全国遭受酸雨污染的农田约4000万亩，每年损失15亿元以上。另外，还使管线、建筑物的钢筋等的腐蚀加快。

16. 赤潮

前已述及，20世纪70年代以来我国沿海海域的赤潮发生的频率呈加快趋势：20世纪60年代有记录的赤潮为3次，20世纪70年代为9次，20世纪80年代为74次，进人20世纪90年代更加频繁，1990年就发生34次，1998年为22次。发生赤潮的水域面积达几百至几千平方千米，持续时间可达20～30d。

17. 流行病

各种流行病是自然因素和人为因素作用的结果。20世纪80年代末，我国25种主要传染病的年发病率超过500万例，包括流感在内的各种传染病患者约1亿人，其中结核病患者560万余人，每天死亡900多人。我国是各种类型的肝炎的高发区，我国有11种地方病，1983个县是地方病高发的疫区，有各种地方病患者6000万余人。另外我国每季度还要发生300余起较大的食物中毒事故，中毒人数近万人。

根据近30年来我国各省、市、自治区主要自然灾害（地震、干旱、洪涝、台风、冰雹）的年发生频率，可将各省、市、自治区划分为多灾区、中灾区和少灾区。表3－7是1951～1980年我国各省、市、自治区主要自然灾害发生频率及分区。

除了自然灾害外，我国的各种人为灾害也十分频繁。1950～1988年（缺1966～1970年

表 3－7　1951～1980 年我国各省、市、自治区主要自然灾害发生频率及分区

分区	主要灾害发生平均频率，次/a	省、市、区（灾害发生频率）
多灾区	2～5	广东（5.0）四川（3.41）福建（3.13）台湾（2.68）河北（2.4）
中灾区	1～1.9	山西（1.40）辽宁（1.22）江苏（1.76）浙江（1.53）安徽（1.48）江西（1.09）山东（1.83）河南（1.41）湖北（1.31）湖南（1.36）广西（1.98）海南（1.79）云南（1.67）陕西（1.53）甘肃（1.74）宁夏（1.11）黑龙江（1.01）
少灾区	<1	吉林（0.68）贵州（0.96）西藏（0.67）青海（0.56）新疆（0.70）北京（0.46）天津（0.49）上海（0.30）内蒙古（0.95）

注：资料引自延军平等：跨世纪全球环境问题及行为对策，科学出版社，1999。

资料）共发生火灾 187.2495 万起，死亡 123071 人，伤 226548 人，经济损失（不包括森林、矿井地下部分及军队系统的火灾）约 60 亿元。有资料表明我国每年有自然的和人为的火灾的损失额约为国民总收入的 0.04%，按 20 世纪 80 年代的经济发展水平测算每年约损失 2～3 亿元。

除了完全自然原因造成的灾害外，我国每年还有相当多的人为灾害：我国大陆交通运输事故率较高，按 1984～1985 年的道路交通事故统计，每万辆机动车交通事故死亡率为 100.2，不仅高于台湾（15），而且远高于发达国家（瑞士：2.2；美国：2.7；日本：2.8；英国：3.1；意大利：3.2；法国：4.8）。20 世纪 80 年代末每年死于交通事故的人数近 20 万人，90 年代则达每年死亡 20 万人以上。公路上、铁道路口是交通事故的多发区，非机动车及无照动力车（如农用车）的事故也不在少数。

全世界每年约发生空难事件几十起，死亡千人左右。我国航空运输的安全信誉较好，少见空难事件报道。我国的船舶，尤其是渔民、个体户的船舶导航能力及抗御风浪能力较弱，因此海难及内河沉船事故时有发生，仅 1988～1989 年在上海至广州水道上就有 1 万多艘船只沉没，死亡 50 余人，经济损失 5000 多万元。近年来，由于片面追求经济效益，我国海难及内河沉船事故呈上升趋势。

威胁人类的主要灾害是地震、洪水和风灾，即自然灾害是人类生存的重要危险。也有一些危及人类生存的祸害是完全或主要由人类活动引起的，如战争，疾病瘟疫（如艾滋病）传播，交通事故等，这一类灾害严格来说应属于"事故"。应该说，现代社会的一个特点是人类活动会诱发某些自然灾害或加剧一些自然灾害的危害程度，如全球气候变暖，臭氧层空洞等。另外，自然界的灾害也会诱发或加剧人为的各种"事故"，如灾害性天气会增加交通事故（尤其是海难、空难事件）的发案率，地震会引起火灾，通信中断，加剧瘟疫传播和流行。在讨论人类的生态环境问题时，对这些问题应给予关注。

二、抵御自然灾害的能力薄弱

我国人多地少，为解决生存问题，毁林开荒、过量开采地下水、过度放牧，以及在经济建设上过分依赖资源开发，若干项大的基础设施工程在立项时对可能发生的生态环境的变化和影响认识不足，在经济发展上一度急于求成（"大跃进"式的全民蛮干），违背自然规律，公民，尤其是领导人的保护生态环境意识薄弱都是我国生态环境脆弱的原因，而生态环境的脆弱则是很多自然灾害频繁发生的重要诱因。

新中国建国以来在抗御自然灾害方面，尤其是在防御洪水方面花了很大力量，也有一定

成绩，例如黄河半个世纪以来没有决口，海河及淮河的水患得到一定程度的治理，基本改变了“十年九灾”的面貌。但从总体上来说，中国抗御自然灾害的能力还是薄弱的，表现在以下三方面。

1. 重要的防灾设施及工、民用建筑的设防标准偏低

我国在20世纪70年代以前的建筑物在设计上很少考虑抗地震的要求，甚至有一些重要工矿企业建设在重要的地震活动区或其附近。我国农村的房屋，在建筑设计上基本没有考虑防震、抗震结构，因此地震中房屋倒塌严重。我国各大江河堤防的设防标准一般为防20～30年一遇的洪水，在工业区、农业区没有明显的差异，与国外相比，大城市的设防标准偏低。国外大城市附近河流堤防的设防标准，一般是要能防50年一遇的洪水，甚至要求能防100年到150年一遇的洪水（印度：50年；捷克：100年；澳大利亚：150年；土耳其：100～500年；日本，重要河川设防标准为100～200年一遇的洪水）。因此一到汛期长江沿岸大城市的防洪年年紧张。

2. 抗灾设施布局的科学性及管理工作不够完善

抗灾设施的布局和建设取决于对灾害发生规律的认识及资金上可能投入的程度。以水利建设为例，应该说，50年来抗御了多次大洪水，功不可没。但是对长期气候变化规律与洪水关系规律的认识有待深化。我国在水利设施建设上有“重水库，轻堤防”的倾向，一些水库的设计标准过高，一些水库的立项科学论证不够充分，致使一些水库建成后逢连年干旱无水可蓄或因水库地质条件的原因无法蓄水。对我国目前兴建的两大水利工程项目——长江三峡水利枢纽工程和黄河小浪底水库，应该看到其局限和不足：三峡水库可拦截长江上游的特大洪水，但对长江中下游自产洪水泄洪能力有限（虽可通过调峰，减轻中下游洪水对堤岸的压力），近年的水文记录表明，长江水灾危害最大，发生频率最高的地区是洞庭湖、鄱阳湖和淮河地区（见1999年《二十一世纪城市水资源国际学术研讨会》资料），因此“对长江水患的根治，过分寄望于三峡水库的防洪效果”是不实际的。

对黄河小浪底水库，由于黄河连年断流，很可能建成后或蓄水量不足，甚至无水可蓄，因此可防“千年一遇”的洪水很可能是一句空话。我国在水利设施的管理上存在的另一问题是“重新建，轻维护”，堤防及分洪设施建设完工后管理维护薄弱，分洪区内乱建房屋及企业，洪水到达时分洪措施难以落实。由于对堤防的建设施工质量，建成后的维修都存在薄弱环节，1998年长江洪水期间九江附近发生溃堤事故就是严重教训。

我国从20世纪50年代末期以来工业布局受当时政治因素的影响，布局不科学、不合理。工业设施的布局不考虑地理环境的特点，有些重要工业项目设在地震活动带上，有些工业企业，沿山沟布局，不仅生产、生活不便，而且不利于污染物的扩散。在城市建设上，不考虑城市不同功能区的划分，不考虑居民的生活和健康，在城市的上风方向，在水源上游，在文教区、风景区安排对环境污染严重的工业项目，甚至是污染扰民严重的作坊，这些都加剧了城市的污染（空气、水、噪声），并成为某些灾害的潜在根源（城市火灾、道路集体事故）。

3. 资源开发偏重短期经济效益

由于受短期经济利益的驱动，我国在相当一段时间内，经济发展是以自然资源和人力资源的过度消耗为代价，除了众所周知的森林过量砍伐外，工业生产的技术水平低，使万元国民生产值中的能源消耗（是美国的4.7倍）、水消耗（生产1t钢的耗水量是美国的17.5～25倍）、矿产资源消耗都高于发达国家，甚至比一些发展中国家都高。资源过度消耗导致生

态环境的恶化，每年多消耗1亿t标准煤，要多排放280万t SO_2 及3000万t烟尘。另外，短期经济利益驱动的建筑质量不高（如房屋和道路），使自然灾害到来时的损失加剧。

除以上三方面外，在深层文化层次中，儒家的"天命"观，其消极方向发展为"听天由命"，即"天灾不可抗拒"和片面理解的"人定胜天"两种意识都在起作用。另外，佛家的"因果"观和道家的"感应"观都对中国人的灾害观发生影响。由于认为"天灾不可抗拒"、"听天由命"，"天灾是因果报应"，"自然灾害是改朝换代的征兆"等都使我国在深层文化层次上对自然灾害持消极心态。因此，虽然我国有世界上最早的自然灾害记录，而且相当完整，但全民的防御自然灾害的意识并不强烈。封建王朝对防御自然灾害的责任感淡薄，即使到新中国，在自然灾害的预测方面的投入，对于我国这样一个自然灾害频繁的大国并不相称，例如我国对较常见的龙卷风灾害既无观测手段，又无完整的观测记录资料，当然也就谈不到有可靠的预警及测报系统。2001年5月1日在重庆市的武隆县发生山体滑坡并造成74人死亡后，政府工作组负责人认为，这是一起地质灾害，并认为，地质灾害不可能避免，但可认识和防范。但是，到目前为止，对地质灾害应该由谁监测和防护，对建筑物附近的山体应该由谁防护，防护标准如何，均无法律规定。政府对地质灾害防护意识的薄弱，可见一斑。我国在灾害面前常见的口号是"把灾害造成的损失减少到最小程度"，其实更应该提倡的是以预先测报及预防为基础的口号："把发生灾害的危险减小到最小程度"。

由于片面的理解"人定胜天"，在自然资源的开发方面实行后果严重的破坏性开采，导致生态环境恶化，灾害发生频繁，在灾害发生时，又动用大量财力物力与灾害对抗，采取"严防死守"，鼓吹"人在堤在"、立"生死牌"等违背以人为本的口号。其实更应该尊重自然规律，利用自然规律，吸取在自然灾害发生时，有些地区灾害严重，有些地区危害较轻的教训和经验。总之，人类应该不断的总结经验和教训，使人类的的活动不超过自然界允许的范围。

第四节　自然灾害带来的地球物理问题

地球科学的两种重要功能是防止地质灾害和保护生态环境，尤其是在资源勘探开发达到如此高水平的今天，防止及预测自然灾害应是地球科学重要的研究内容和应用领域。地球物理学科在自然灾害预测和防治方面至少有以下几方面的研究内容：第一，研究自然灾害及人类活动引起的大气圈、水圈、及地表的变化，并对这些变化的后果进行预测和评价；第二，以保持岩石圈的表面（或生物圈）的生态功能为目的，研究控制和保持岩石圈表面生态环境稳定的理论和方法；第三，以保持岩石圈上各种块体的生态功能为目的，研究控制岩石块体的状况和性质的理论、方法和技术，其中包括对地震和各种地质灾害的预测和监控。以上就是环境地球物理学学科发展的基本思路。现阶段环境地球物理学的主要研究和应用领域至少包括以下方面。

一、地震预测及震情监控

虽然地震学已经是地球物理学科中稳定而意义重大的学科，但地震涉及的生态环境问题，尤其是地震的预测问题仍然是环境地球物理学关注的问题。

1．地震预测的一般表述

地震预测是对破坏性地震（$M_s>5$，可能对生命财产构成威胁的地震）的时间、区域或地点、震级做出概率预测。对天然地震能否预测？目前国外地球物理学家的看法并非一

致。但地震预测是现代科学还未能解决的重要难题，则是不争的事实。由于地震的机理和过程极其复杂，因此地震预测是高风险、高探索性的科学活动。虽然同属地球物理勘测，但与矿产资源勘测相比，地震预测有很多与资源勘测不同的特点。首先，研究对象的差别。矿产资源勘测的对象是在一定范围内存在的物质实体，这些物质一般在地球浅表处的地壳中存在，其埋藏深度为几百米至几千米，至多十几千米，有开采价值的矿体的几何尺度是在几千米至几十千米，乃至上百千米的数量级（除了金矿、金刚石矿等贵重矿产的矿脉厚度仅为几米、乃至米级以下），就勘测过程所经历的时间尺度而论，这种物质实体实际上是不变的。

地震预测的研究对象从地震现象的本质来说，是研究地球内部的能量聚集（孕震）和释放过程，这种过程所依托的地质介质的位置，可在浅表的地壳（几千米至几十千米）中，可在地幔（上百千米至几百千米），甚至还可能在地球深部。参与孕震的地质介质的几何尺寸可从几百千米变化为几百米，而且在可能的观测过程中，孕震介质的几何尺寸和物理状态都在改变。第二，观测方法和条件。矿产资源的地球物理勘测是用相对流动技术手段对相对静止的矿物实体进行勘测，在观测时间上允许间断；而地震预测则是用相对固定的地震台网或其他手段对地质介质中的流动过程进行检测，这样在观测时间上的间断，将影响预测效果。第三，观测手段的选择及观测空间。矿产资源的地球物理勘测的技术手段经过多年的筛选，已经有了成熟的技术系列，例如对石油天然气资源的地球物理勘测，地面（横向）的方法主要是人工地震勘探，井下的勘测方法主要是电学、声学和核物理学测井方法。也就是说在各种观测空间中都有成熟的技术和相对更为规范的方法。地震预测的观测空间与其要解决的问题相比，条件要困难得多。地震预测的观测空间绝对不如可在任何需要进行观测的位置进行测量的气象观测。可以说，气象观测的空间最为“自由”。地震预测的空间也不如矿产资源的地球物理勘测的空间：有航空测量、地面测量、井下测量和实验室测量等不同层次、不同观测精度的观测空间。另外，地震预测台网的布局还要受到实际条件的限制：全球85%的地震发生在海上，而全世界绝大多数的地震台网则分布在陆地或陆地附近，这样就产生了一个矛盾：地震发生最频繁的区域却是观测台网最稀疏的区域。除此以外，地震预测的困难还有：

复发周期长。两次中强以上地震的间隔时间可达几百年，与气象预测的规律相比，其规律更难掌握。

类型多样。地震释放能量的形式至少有前震—主震—余震型（例如，1975年2月4日，辽宁海城 $M_s=7.3$ 级地震），主震—余震型（例如，1976年7月28日，河北唐山 $M_s=7.8$ 级地震），孤立型（例如，1950年8月15日，西藏墨脱 $M_s=8.6$ 级地震），群震型（例如，1997～1998年，新疆伽师9次 $M_s>6$ 级地震）。由于释放能量过程不同，其表现行为各异，因此地震和异常现象间的关系复杂，可能存在有异常有地震，无异常有地震，有异常无地震等三种情况（无异常无地震的情况未计）。

孕震介质周围的地质构造条件不同。因此其能量聚集和释放过程所表现的行为不同，即使同一震源的两次地震的前兆现象也可能不同。

地震前兆现象观测困难。观测点多在地表或地表附近，距震源太远、信噪比过小，前兆现象重复性差，甚至对前兆现象的认定都很困难。

地震预测问题的困难主要表现在再现性差，问题的解决至少要在以下三个方面的研究有所突破：第一，孕震机制和孕震过程的研究；第二，前兆现象的准确认定并有可靠的检测方法；第三，建立布局合理全球范围内的观测台网。

地震预测的基础是：全球（或全国）地震台网的建立；全球及区域地震活动的研究；地震活动的历史特点研究；地震观测仪器的研制；地震预测方法的研究。或者说地震预测的科学内涵至少要包括以上五个方面。

2、地震预测的分类

地震预测按其预测时间的尺度分为：长期预测（几年至几十年），中期预测（几个月至几年），短期预测或临震预测（几天至几个月）。

1）长期预测

地震的长期预测以以下理论为主要思路，这些理论是：第一，地震重复周期论。该理论1958年提出，认为从天然地震的历史记录和考古地震学的研究表明，大地震的发生都具有一定的周期性。例如中国华北1679年发生在河北三河、平谷的大地震（估计为8级）与1976年的唐山大地震（7.8级）时间约相隔约300年，与华北地区地震活动的重复周期相吻合。再如我国云南省是地震多发区域，相当一些地区约在50年后会重复发生地震，见表3－8。

表3－8　云南省地震重复发生事件统计

首次出现年份	地点	震级 M_s	重复出现时间	地点	震级 M_s	间隔年数
1913年	峨山	7.0	1970年1月4日	峨山、通海	7.7	57
1917年	大关	6¾①	1974年5月11日	大关	7.1	57
1923年	沧源	7.3	1974年5月29日	龙陵	7.3	53
1925年	大理	7.0	1976年	宁蒗	6.7	51
1925年	勐腊	6¾①	1979年	普洱	6.8	54
1941年	耿马、澜仓	7.0	1988年11月6日	澜仓—耿马	7.6	47

①震级为推算值。

还要说明的是与云南邻近的四川和西藏也有类似观测记录：1897年与西藏相邻的印度阿萨姆邦发生8¼级地震；53年后，西藏察隅发生8.6级地震。1923年四川炉霍发生7¼级地震；50年后1973年2月6日在炉霍再次发生7.6级地震。

第二、地震空区理论。该理论1965年提出，认为地震多发生在地球上各大板块的交界面附近，即板块的俯冲带上，因此各板块边缘附近，凡未发生过大地震的区域，以及被中小地震包围的区域都可能是发生大地震的区域。1965年苏联的萨道夫斯基对堪察加半岛附近近50年内的强震活动的区域进行了预测，结果1965到1983年发生的5次 $M_s>7$ 级以上地震都发生在预测区域内。美国的麦克坎（McCann）在20世纪80年代中期编制的《主要板块边界地震危险性区划图》勾画出的环太平洋地震空区中，已有8个空区被后来发生的地震所填满。若加上1965年以来地震预测成功的案例，共有14个空区被填满。

但长期预测还有许多重大问题没有解决：首先是板块内部是否会有地震？板块内部何时发生地震？应该指出，板块内部的地震在机理、孕震机制、预测方法都比板块边缘的地震问题更为复杂。另外，即使是在板块边缘，已发生过地震的区域是否还会发生地震，未发生过地震的区域（空区）何时发生地震？都是悬而未决的问题。

2）中期预测

对几个月至几年内发生的地震，尤其是板块内发生的地震进行中期预测是地震预测中最

困难的问题。对板块内的地震预测涉及板块内部地震活动性和规律的认识等更为复杂的问题。目前对这些问题还不可能有深刻的认识，因此中期预测多采用统计、归纳的方法给出概率的结果。另外，应该说明，就全球来说，地震活动在时间和空间上都是非均匀的，即地震往往发生在某些特定的区域（地震带或地震活动区），地震活动又有活动期和宁静期的差异。因此在非地震带及宁静期，用统计归纳的方法得出的预测值往往偏高；而在地震带及活动期内预测值又往往偏低。

地震的中期预测的关键是预测方法应该有地质—地球物理基础研究方面的支持。

3）短期预测及临震预测

在地震发生前几天至几个月对地震发生的地点、时间和震级进行预测的主要根据是地震的前兆现象。地震的前兆可能是地壳的升降、断裂位移的改变、地下水水位的改变、地下气体（如氡 Rn）逸出量的改变、动物异常行为等。但短期预测的主要困难是对地震前兆现象本质的认识。某些前兆现象并不一定在每次地震前都出现，甚至两次地震的前兆现象可能完全不同，有的地震在其发生前也可能观测不到明显的前兆现象。例如我国曾经根据强震前小震活动频繁等前兆现象对 1975 年 2 月 4 日在辽宁海城的 $M_s=7.3$ 级地震成功地进行了预测，成为世界上成功预测大地震的经典案例。但一年后发生在唐山的 $M_s=7.8$ 级地震则因震前无明显的前兆现象（或可能是前兆现象还未能认识）而未能预测，造成了死亡近 25 万人的灾难。在国外，1980 年 5 月日本伊斗半岛发生 $M_s=6.7$ 级地震；1987 年 12 月日本房总半岛近海发生 $M_s=6.6$ 级地震；都发生在日本地震观测网最密集的区域，但都因没有观测到前兆现象而未能预测。

短期预测的困难是对临兆现象的认定。例如，一般认为，地壳升降速率的改变是地震的重要前兆现象之一，但在西伯利亚地区，地壳上升的速率比邻近的贝加尔裂谷地区高 4～6 倍，可是西伯利亚地区并没有发生大地震的记录。因此地壳升降速率的改变虽然相当普遍的被认为是地震的前兆现象，但又确有存在这种前兆现象而并不发生地震的事例。

根据前兆现象进行地震短期预测的特点是对地震活动进行表象研究，而并不涉及对地震的机理和孕震过程的深入考察（例如对动物异常行为的观察），而前兆现象与地震发生的机理及孕震机制的关系的认识都尚待深入。

3. 地震预测方法概述

天然地震的预测方法大体可分为三类：以对震源机制和孕震过程进行推理、模型研究的正演方法；将地球上的地震活动视为一种随机过程的、对其时间和空间分布特征进行统计归纳的，按随机过程研究方法进行统计分析并给出地震发生概率预测结果的方法；根据地震前兆现象进行预测。

1）正演方法

用推理和模型方法对震源区孕震的物理过程和地震发生的模式进行研究。震源区孕震的物理过程及地震发生过程的模式是非常复杂的问题，通常是以一定的理论假设为前提，给出地震孕震和地震发生的前兆和发震模式的模型。目前已有的模型是：

断层失稳模型。该模型认为岩层中存在尺度不大、均匀分布的微裂缝，随岩层中的构造应力增加，新的微裂缝出现，新旧微裂缝间的相互作用，加速了岩层的断裂过程，并表现为岩石平均变形速率加快。当微裂缝的密度达到某个极限值时，发生裂缝合并及失稳扩展为断裂。新产生的断裂集中在一个或少数几个断裂带上，此时除少数断裂带外，岩层的平均应力将随平均变形速率的下降而减小，并在断裂失稳发展过程中最终形成宏观的大断裂，即发生

了地震（主震）。这种模型以岩层的应力状态、应变、平均变形速率、地震波速度变化作为地震的前兆现象。

膨胀—扩散模型。该模型认为，地壳中常见的结晶岩石（花岗岩、辉绿岩、石英岩等）在其所受应力不足以使岩石破裂时，随应力增加，伴随岩石的微裂缝增加和孔隙体积增大，岩石的体积呈现非弹性增加（这就是岩石的体积膨胀现象）。由于孔隙体积的增加及孔隙压力下降，会导致其他区域（非震源区）岩石孔隙流体向孔隙压力的降低的膨胀区域扩散和流动（这就是扩散）。由于扩散使膨胀岩石的孔隙压力增加会使岩石强度下降并最终导致岩石破裂，即发生地震。这种模型以岩层的地震波速度、纵横波速度比值、岩层孔隙压力、电阻率、岩石的体积应变作为地震的前兆现象。

板块边缘的凹凸模型：该模型认为一个板块向另一个板块楔入（或俯冲）时，由于板块边缘不平整，会导致变形不均匀并诱发地震。

除了这些模型以外还有模拟泥块脱水干裂的“干裂式模型”，模拟岩体中的裂缝吸水发生裂缝滑脱的“湿模型”等。这些模型，尤其是断层失稳模型及膨胀—扩散模型在地震预测上都曾取得过有限的成功。但这些模型都将地震限定在板块边缘或大断裂附近，而对在震前没有明显断层的区域，这些模型难于对地震进行预测（如唐山大地震）。另外，这些模型还缺乏地球深部岩层物理过程的实验及观测资料的检验。还需要指出，根据这些模型描述的地震前兆现象还可能是互相矛盾的，即同一前兆现象（如地层电阻率降低）在某种模型（膨胀—扩散模型）中可能是地震前兆，而在另一种模型（如“干裂式模型”）中，同样的现象可能与地震无关，甚至是相反的现象（地层电阻率升高）才是地震前兆，这就给反演问题——根据地球物理观测结果预测地震带来困难。

2）统计、归纳方法

这种方法从本质上说是数学方法，即从已知的地震现象推测未知的地震现象，从过去的地震现象推测将来的地震现象。从方法上说，可以是统计学的方法，即根据已发生的地震或已观测到的地震记录，按随机过程模型或某种确定的数学模型，对可能发生地震的区域、时间及地震震级进行预测。由于在统计方法中往往看重平均规律，而地球上的地震活动在空间及时间分布上呈现明显的非均匀性，因此可能在地震活动区的预测结果偏低，而在地震活动宁静区预测结果偏高；在地震活动期预测结果偏低，而在地震活动宁静期预测结果偏高。另一种方法是以分析与地震有关的信息，尤其是地震的前兆信息，参照某些确定的模型进行预测。实际上是根据已有的前兆或震后的其他信息，建立某种信息模型，再根据模型及最新的观测结果给出预测结论。这种预测方法有过成功的案例。但这种方法一方面由于可进行比较的地震案例不多，尤其是前兆记录完整的地震全过程记录不多，因而预测模型粗糙，另一方面受预测者的主观因素影响较大。

3）前兆现象研究

地震前兆现象研究是地震预测的一个重要方面。地震前兆是地震前的异常现象，按震前异常现象出现的时间，大致可分为两类：第一类为震前几十天至数年间发生的异常现象。这一类前兆现象多是由于地壳应变接近极限状态，由膨胀、塑性变形等物理过程所引起，这类异常表现为区域地震活动性的异常、地震波速度异常、地壳运动异常、地层电阻率异常。这类异常的变化较缓慢，其持续时间及分布范围往往与未来地震的震级有关。第二类为震前几分钟至几天内呈现的异常行为，相当一部分前兆现象与临震前岩层的蠕动性破裂有关，包括前震现象、地倾斜、地应变、地下水异常、地声、地光等异常现象。这类异常变化急速，异

常出现的区域往往是将要发生地震的区域，而这类异常与地震震级的关系不明显。目前主要的震前异常现象包括：

地壳变形异常。地壳变形贯穿地震活动的全过程，地震是地壳变形发展到一定阶段的结果。震前地壳变形异常中最显著的现象是变形速率的增加和方向的改变。

地震活动异常。指某区域的地震活动性在时间、空间及强度方面显示的异常现象。大地震前，在未来的震源区及其附近区域的地震活动增强，以致发生前震（如 1975 年辽宁海城地震）。但也可能在未来发生地震的区域地震活动明显的减弱。

地震波速度异常。当震源区的地层的物理性质改变时地震波的速度也会发生变化。地震前出现异常通常表现为纵横波速度比 v_p/v_s 偏离正常值而减小，当其下降至最低点并恢复到正常值附近时可能发生地震。纵横波速度比 v_p/v_s 异常持续的时间越长，可能发生的地震震级越大。但近年也观察到一些反例，即强震前并无地震波速度异常。

地磁异常。地震前岩层的磁异常是由于岩层的应力状态发生改变，因而岩层中磁性矿物的磁畴排列发生改变，因此发生磁异常。但这种磁异常往往是地磁场背景值上的较弱信号，因此，排除干扰，提取与地震过程有关的地磁信号仍是一个极为困难的问题。另外，也观察到与上述机理不同的周期较短、幅度较大的地磁异常，这些异常的机理及与地震的关系尚待进一步研究。

地电异常。在孕震过程中，岩层的应力状态将发生变化，相应的岩层电阻率也会发生变化。另外岩层在产生微裂缝的过程中，其孔隙体积也会发生变化，岩层孔隙中的流体（水）也会随孔隙压力的变化而发生运动，这些都会使岩层的电阻率发生变化。

地下水异常。由于地下水对地壳应力场的变化十分敏感，因此地震前后地下水水位、水温、流量、地下水的化学成分可能会有所变化。典型的例子如 1976 年陕西龙陵地震前，震中区内的巴腊掌温泉的水温平时为 81℃，震前 11 天开始上升到 91℃，地震后水温立即下降。1966 年苏联塔什干地震前首次报道深层地下水中的氡含量增加，此后中国的海城、龙陵、唐山、松潘大地震前也观测到地下水中的氡含量增加。由于地下水的变化，可引起河流、湖泊、泉水水面的上升或下降，水发浑、变味、冒泡、冒沙水等现象。已有资料表明，地下水位及其化学成分的变化是中等强度地震及大地震前的常见现象，因而可能成为短期预测及临震预测的手段。

地声与地光。地震前的地声有的是人耳能听到的宏观地声，其声如雷、如炮声、坦克声等。有的是人耳听不到的、仅由仪器记录到的微观地声。实验证明岩层中应力达到岩层破裂强度的一半时声发射信号明显增加，当岩石中的微裂缝进一步扩展时声发射信号的频率降低，而易被接收到。由于地声多在临震前出现，因而对临震预测是有意义的。地光通常是和地震同时发生，对地光产生原因的一种解释是岩层中的石英在应力作用下产生压电效应，并在地表附近释放电荷及形成电磁场。也可能是岩层在地震发生的过程中，一部分能量以电磁能的形式释放。

动物行为异常。地震前由于地下水、地温、地磁场、气候的变化可能是动物行为异常的原因。多数动物行为异常发生在震前的一天以内，少数的动物行为异常则可能出现在震前的几天至几十天。

除上述异常外，还可能有地温、重力、气象、油井动态、电磁波传播的异常作为地震的前兆现象。但由于地震的孕震过程复杂，地震的发震模式多样，因此对前兆现象的本质，究竟什么现象才是地震的前兆？哪些前兆现象能预测地震的区域？哪些前兆是预测地震震级的

标志？在前兆现象发生后多长时间可能发生地震？这些都还要进一步研究。

二、人类活动引起的生态环境变化及相应的地球物理场变化的评估

环境科学和地球物理科学都研究和考察“全球变化问题”，但是两者的内涵并不完全相同。环境科学中的全球变化在时间尺度上主要是指人类活动或有人类历史记录以来的变化，在空间上则偏重于与人类生存有关的大气圈、水圈、生物圈内的变化。而以认识地球为学科最终目的的地球物理学所考察的全球变化在时间尺度上则主要是有地球以来，地球的发展和变化，其时间跨度要比环境科学的研究范围大得多，在所研究的空间上，虽然说包括大气层、电离层甚至包括外层空间的整个地球及其延伸部分，但主要的研究空间还是集中在岩石圈。若作一个不严格的界定，可以有条件地认为，地球物理学的研究在时间上更偏重“历史”和“固体”，环境科学则更偏重于“现实”和“流体”，但两者在都关系到人类的生存和发展方面则是一致的。

由于环境科学和地球物理学在研究内容、目的等方面的差异，因此在观测手段、测量精度、测量条件、工作方法方面都有明显差异，因而环境地球物理学科应该在用地球物理方法解决环境科学问题方面进行分析、协调，使之匹配。目前有希望的方向是以下几方面。

1. 全球变化研究和同位素地层分析

地球物理学科的一个重要研究内容是用地球物理方法进行地层对比，20世纪50年代以后发现某些同位素可作为地层对比的标志物，以后又发现海洋中的有孔虫（如牡蛎、珍珠贝等）类所含^{18}O的多少能反映两极冰盖的周期性变化，因而有可能通过对某些沉积层中的^{18}O含量的分析进行气候变化，尤其是古气候变化的研究。这其中的关键之一是地球物理学对地层的分析在时间上是小比例尺、长时间跨度，而环境科学要求的是大比例尺、短时间跨度。在地球物理学的传统的采样空间有所改变并提高了观测精度以后，同位素地层分析方法有可能在解决全球气候变化历史研究方面起更大作用。

2. 岩石矿物分析和全球水（海）陆变迁的研究

地层中的某些特征矿物，如黏土矿物中伊利石、高岭石、蒙脱石的含量变化，砂岩粒度的变化、碳酸岩盐中白云石和方解石的比例及泥质矿物的含量，都是沉积环境改变的标志，从中应该发现更能说明全球变化的例证。

某些特征地层的应用，地层中某些特征层位，如在磁学性质上有特殊显示的层位，有某种特殊生物化石的层位都可以作为某些特殊环境的标志。

3. 自然灾害发生规律及各种自然现象间相互关系的研究

地震和日地关系的研究。据对1900～1996年在中国发生的106次7级以上地震的统计分析发现，有75次（71%）发生在月亮轨道与赤道交角变小的时间阶段。中国在本世纪内有76次（72%）7级以上地震发生在地球自转速率加快——日长变短的时间段上。本世纪太阳活动有13个峰值年和14个谷值年，在这太阳活动为高值和低值的27年中，共发生过38次7级以上地震，其中14个谷值年中有11年共发生21次，仅有3个谷值年没有发生大地震（在这3年中有2年是处在月亮轨道与赤道交角较大的“月亮运动少震区期”内。在13个峰值年中有7个峰值年没有发生过大地震（在这7年中月亮轨道与赤道交角较大，为“月亮运动的少震期”），而在其余的6个峰值年中共发生过17次大地震，其中有5年处于月亮轨道与赤道交角较小的“月亮运动的多震期”。

地震和气象灾害关系的研究。对人类活动影响明显的热带风暴的研究有两个值得关注的方向：研究减弱风暴及其作用后果的可能性；另外是热带分辨的预测。由于热带风暴携带巨

大的能量，因此除了对大气层有影响外，还可能对地层发生作用，甚至有研究认为热带风暴（气旋）和地震之间有一定关系。有研究结果表明地震与热带风暴（气旋）之间有一定关系。俄罗斯的研究机构曾对赤道以北，北纬40°以南，东经100°至180°间的区域内热带风暴与地震关系进行过统计分析和研究，认为所研究区域可分为两个小区域：（1）日本及附近海域（N23°—N40°，E122°—E155°之间的区域）；（2）菲律宾—南中国海区域（赤道以北至N20°，E108°—E135°间区域）。对这两个区域内1957～1987年的热带风暴和地震活动进行了统计分析，其结果表明，地震活动（用释放的能量表示，单位：J）和热带风暴强度（用风速表示，单位：m/s）间有某种相关关系。总的规律是，热带风暴强烈的年份与地震活动强烈的年份大体一致。在日本及附近海域，1958～1967年热带风暴和地震活动都强烈；而1978～1987年则是热带风暴和地震活动都减弱的时期。在菲律宾—南中国海区域，1957～1967年是热带风暴和地震活动都较弱，而1978～1987年热带风暴和地震活动都较强烈。个别地震台站记录到的热带风暴最大强度时间（1991年9月3日）与地震活动最强烈的时间（1991年9月8日堪察加地区7.2级地震）还有一定对应关系。

另外除了地震引起的次生灾害以外，有研究表明厄尔尼诺（El Nino，西班牙语，“圣婴”）现象与海底地震有一定关系：1964年以后有5次厄尔尼诺现象的发生时间都与在大洋板块间发生地震的时间相吻合，即认为地震发生前后，有一部分能量释放是通过海水升温来实现的。

三、环境地球物理学关注的其他生态环境问题

除了前已述及的与自然灾害及全球变化问题以外，地球物理学还应关注生态环境领域中的与人类活动关系更密切的问题。

1. 地表水与地下水污染的测量和监控

水是人类消耗的主要自然资源之一。根据联合国环境规划署（UNDP）的测算，100万人口的大城市每天要消耗62.5万t水，2000t食物，9500t燃料；同时产生50万t废水，2000t固体废弃物，950t大气污染物。人类的淡水资源面临过量开发、水体污染日趋严重，同时由于农业用水量过大，而且浪费严重。因此缺水国家和地区增加，人均水资源量减少，一些重要河流和湖泊污染日趋严重是21世纪人类面临的重要难题。因此，对地表水和地下水污染的监控应该是重要的课题。

地球物理学方法和技术是监控地下水和地表水污染的重要手段。20世纪70年代，在中东地区曾经用噪声测井方法成功地监测在深处的油田水通过技术套管对浅层淡水的污染。此外，电测深法和电阻率测井法、自然电位测井法都能分辨电阻率高的淡水（电阻率为10～100Ω·m）和电阻率低的咸水（电阻率为10Ω·m以下）。在我国的大庆油田，曾根据不同年代在第四纪明水组浅层地下水层段的自然电位测井结果和视电阻率测井结果，评价地下淡水层的污染状况。该项研究认为，要用测井资料评价地下水体的污染，应该提高现有方法的观测精度。在挪威，20世纪90年代就根据对2452个地下水污染源的调查，编制了全国地下水分布及污染状况的图件。在地面水的污染监控方面，俄罗斯的莫斯科河和中国昆明滇池都有用电阻率测量和自然电位测量测量监控河水和湖水污染状况、查明污染源的成功案例。近年来，用核磁共振方法在探察基岩裂隙水、山前冲积扇区地下水、平原区地下水、黄土区地下水方面有明显成效，应该说明，核磁共振方法除了可能探测出地下水外，还可能进一步查明地下水中的某些元素成分，因而可能在地下水污染监控中发挥作用。

在油田和油气开发区还可将氨（NH_4^+）的含量作为水体污染和生态环境质量的指标。

由于人类活动，含氮的有机物可变成氮的氧化物（NO_x）并进入水体，在水体受到污染时，由于耗氧量增加而向还原环境变化，氮的氧化物（NO_x）可还原为氨（NH_4^+），因此在某些油田习惯上将水中的氨（NH_4^+）含量作为水体污染的指标，即将水中氨（NH_4^+）含量分为以下等级：

0.3μg/L 以下，无污染；0.3～1.0μg/L，轻微污染；1～40μg/L，有污染；40～500μg/L，重度污染；500μg/L 以上，严重污染。

根据水中氨（NH_4^+）的含量和其他指标，如 pH 值，还可进一步研究污染物的成因。

近年来，由于流入海洋的河流中污染物增加、海上油田的开发和油轮泄漏，石油污染海水的状况日益严重，尤其是近海水域的污染引起关注。有研究认为，海水污染主要发生在陆棚区域，由于污染物对海水的污染，使陆棚区的自然电场结构和海水的电阻率都发生变化。原苏联曾经对北半球部分海洋中海水的电阻率进行过长期（15 年）大量（测试样本超过 12000 个）测量。即用与电法测井类似的四极装置对不同陆棚区域海水的电阻率进行测量，其结果是：白海陆棚海水的电阻率为 0.27～4.00Ω·m，巴伦支海陆棚海水电阻率为 0.28～0.95Ω·m，红海陆棚海水电阻率为 0.4～0.7Ω·m，拉普杰夫海陆棚海水电阻率为 0.4～1.3Ω·m，东西伯利亚海陆棚海水电阻率为 0.4～1.3Ω·m，楚科特海陆棚海水电阻率为 0.4～0.9Ω·m，伯令海峡陆棚区海水电阻率为 0.35～0.65Ω·m。陆棚区海水的电阻率随海水的含盐量、温度、深度、空间坐标和时间而变，可根据多年的测量结果给出陆棚区海域海水电阻率与上述参数的经验公式，这些都是评价海水污染的基础性工作，当海水受到污染时，其电阻率和自然电位分布将发生变化。

2. *城市建筑物的环境地球物理问题*

城市中新的建筑物（尤其是高层建筑物）和工业设施的增加将导致城市生态环境的变化，如地面沉降等。城市表层土壤的变形是评价城市生态环境的重要指标，城市表层土壤的各种弹性参数（抗压强度、泊松比、杨氏弹性模量等）对评价建筑物的地基是否会沉降、倾斜都有意义。俄罗斯首先在莫斯科进行过这方面的工作：1993 年 5 月、1994 年 6 月、1996 年 6 月对包括克里姆林宫在内的莫斯科市区进行过地震勘探（用非爆炸震源），根据在 12 个测点上所获得的资料，在莫斯科主要的建筑物分布区作出了两个地震剖面：在第一个剖面上，地表附近土壤分成两层，即厚度为 1.6～3.5m 的"上文化层"，其地震纵波速度为 240～360m/s，下面是厚度为 8m 的纵波速度为 400m/s 的"下文化层"。在第二个剖面上，"上文化层厚 5～6m，纵波速度 250～300m/s，其下为厚 8.5～9.5m、纵波速度为 700m/s 的砂质土；再下面是纵波速度为 900～2000m/s 的泥质岩。根据上述资料，可估算各种不同时代建筑物地基的弹性参数（杨氏弹性模量、抗压强度等），并可作出其分布图。资料处理结果表明，所研究区域建筑物地基的杨氏弹性模量的变化范围是 0.3～3GPa。杨氏弹性模量数值小的区域可能是容易发生地面沉降的区域；杨氏弹性模量变化大的区域则需注意防止建筑物的倾斜。在古建筑物集中的地区，还可定期进行地震勘探（用非爆炸震源）、电法勘探、放射性勘探和重磁力勘探，将其与古建筑物的分布图对比，可评价这些古建筑物地基的变化，可作为古建筑物保护的基础性资料。

3. *查明废弃弹药的隐藏位置和核爆炸的监测*

战争年代遗留的地雷、水雷和其他弹药会影响人类的安全和正常活动。因此用地球物理方法查明废弃弹药的准确位置是地球物理学科的另一方向。例如，曾经用电阻率法、自然电位法、人工电位法查明波罗的海中废弃水雷和其他海底隐藏的弹药。波罗的海海水的电阻率

为0.8～0.9Ω·m（其中芬兰湾海水的含盐量低，海水电阻率达2Ω·m），海底淤泥的电阻率为1.5～2.0Ω·m，随深度增加，其电阻率也增大，在深度为30～40m处，粉砂质沉积物的电阻率达5～7Ω·m。若废弃水雷的横截面积为0.01m^2，长0.6m，其上方吊箱的尺寸为1×1×1m，则因水雷存在会在其周围产生与海水的电阻率背景值相差2%～5%的异常，因此如果电阻率探测系统能测量记录到这种差异，即可查明水雷的位置。俄罗斯在海水中进行电阻率测量的MГK－6000系统可在海水深度为6km以内，在船速为每小时5节（5nmile）时，以测点距为0.5m、每秒测量30点的工作方式测量海水的电阻率和自然电位，并可根据电阻率和自然电位的异常确定废弃水雷的位置。这种方法的优点是效率高，方法可靠，经过测量已经基本排除了二战期间在波罗的海残流的水雷。但在陆地上，由于步兵使用的各种地雷体积小，有的没有金属外壳，因此探测这种地雷还没有高效、可靠的方法，有报道认为，在柬埔寨的残存地雷的区域，一个技术熟练的排雷员，每天能排雷的面积约30m^2。

20世纪50～70年代，各大国都进行过为数甚多的核试验，其中有相当一部分是地下核试验。为研究核爆炸引起的地层或岩石物理性质的改变和核爆炸产生的地震波的频率特性和幅度特性，各核大国都进行了一些工作。例如，美国从1966年开始观察小爆炸当量核爆炸的效果：在半径为17m的地下洞穴中产生当量为380tTNT的核爆炸，在周围200多个观测点进行观测。此后，苏联在较大当量的地下核爆炸中进行过观察，其结果表明，在核爆炸的地下洞穴中充满水（或其他液体）时产生的地震波要比洞穴充满空气时强烈；地下核爆炸时，可在距爆心2500km处的地下记录到地震波，对最强烈的地下核爆炸，则可在距爆心4300km处的地下记录到地震波。根据在距爆心2.3～113km处的地下观测点的记录表明随爆炸当量的增加，记录到的地震波的频率下降。观测经验表明，应在距离爆心4～180km范围内布置观测点，测量记录核爆炸引起的观测点处的岩层位移、地震波速度和幅度及频率，并估算这些参数和核爆炸当量的关系。

1983～1989年原苏联在塞米巴拉金斯克进行过44次当量为6000～150000t TNT的地下核爆炸，在距离爆心0.3～10km的96口观测井进行了系统的观测。观测井井深21～70m，井中有古生代褶皱岩石中的地下水含水层，地下水水面在井深4～66m处，有构造裂缝的含水层的渗透率为6×10^{-14}～$3\times10^{-13}m^2$。观测结果表明，地下核爆炸对地下含水层的的作用主要是破坏了地下含水层在自然条件下的稳定状态：在核爆炸前，地下水水面日变化率仅3～5cm。核爆炸后，由于含水层中裂缝和洞穴的增加及渗透率的增加，使地下水水面大幅度下降，在距离爆心0.5～2.0km的观测井内，地下水水面最多可下降58m，而且地下水水面下降的时间可延续10天至6个月。在距离爆心10km的观测井内，则只有爆炸当量大于150000tTNT时，才能看到地下水水面的变化。

地下核爆炸的力学效果受岩石的各向异性、岩石强度以及岩石在空间分布的非均匀性的影响。岩层地球物理性质对核爆炸的影响还可从爆炸后的余震分布看出：在核爆炸后49h内，余震次数为1.08次/h，随距离爆炸时间的增加余震的次数和震级都减小。所产生的地震波频率为5～10Hz，地表的振幅在0.1μm/s以下；震源深度一般不超过300m。在地下岩块有断裂时，在断裂面上可能发生谐振。

以上只是一些值得关注的方向，还远不是环境地球物理学科将来要解决的生态环境的全部。应该说在21世纪，人类用地球物理学的理论、方法、技术解决生态环境问题将有很多的机会，也将有更多的成就。

小　　结

自然灾害是地球上物质和能量运动的变化并对生物圈的生态环境有明显影响的过程（往往是突变过程），但引起生物圈生态环境变化的原因还有人为的因素，也有自然界和人为因素联合作用的结果。自然灾害引起生态环境变化强烈，造成的损失严重，是人类长期以来就关注的问题。但随人类环境意识的提高，与自然界长期的演化过程相比，人类活动引起的生态环境变化更被关注。我国是各种自然灾害和人为灾害种类齐全、频度高、灾害损失比较严重的国家。地球物理方法可以从各种物理场的变化来预测和评价地球上物质和能量的变异，因而在认识和预测灾害方面，可发挥作用，而且可能是地球物理学在新世纪的主要应用领域。

思考题

（1）如何认识自然灾害的本质?

（2）你认为影响我国生态环境的灾害（包括自然灾害和人为灾害）是哪些?

（3）你认为地球物理学在认识和防治灾害方面能起哪些作用?

第四章　环境地球物理学中的核辐射方法及应用

地球生态环境中的放射性物质来源有三：第一，地壳中放射性矿物释放的放射性核素；第二，由宇宙射线轰击大气或地表中的某些组分而生成的放射性核素；第三，由于人类活动（核试验、核能发电等）产生的放射性核素。在大气圈的对流层中，放射性物质主要由地面放射性矿物衰变产生。

地壳中含有的放射性铀^{235}U、铀^{238}U和钍^{231}Th在衰变时产生半衰期为3.8d的氡^{222}Rn和半衰期为55s的氡^{220}Rn。这些氡在大气中还会衰变成其他重金属子体，如铅^{210}Pb和钋^{210}Po，这些子体也有放射性，在生成后立即被气溶胶吸附，并通过降水或其他过程返回地面。据计算，在雨水和其他沉降物中的放射性活度为：铅^{210}Po，$(1.5\sim8.9)\times10^{16}Bq/a$，钋$^{210}Po$，$(0.74\sim1.4)\times10^{16}Bq/a$。这些放射性物质在大气层中的滞留时间和气溶胶相同，即约为10～25d。

宇宙射线在大气层中和氮、氧、氩作用时，会产生放射性核素，这些核素在大气层中的浓度和宇宙射线的辐射强弱、生成放射性核素的半衰期、大气层中气流活动强弱有关，其种类和半衰期见表4－1，天然放射性核素在环境中的循环见图4－1。

表4－1　宇宙射线在大气层中产生的放射性核素及其半衰期

产生的放射性核素	半　衰　期	来　　源
氢，^{3}H	12.3a	^{14}N，^{16}O
铍，^{7}Be	53a	^{14}N，^{16}O
铍，^{10}Be	2700000a	^{14}N，^{16}O
碳，^{14}C	5600a	^{14}N
钠	2.6a	^{40}Ar
硅	710d	^{40}Ar
磷	^{14}d	^{40}Ar
磷	25d	^{40}Ar
硫	87d	^{40}Ar

20世纪50年代以来，核试验和核工业将大量的放射性废弃物排入大气层，其中氪^{90}K是核裂变产物，已经成为世界性的污染物，在大气层中的含量持续上升。人类活动产生的放射性核素中对人体最危险的是锶^{90}Sr，其半衰期达28a，能进入人和动物的骨骼，在人体内滞留时间可达几年，足以对人体产生伤害。

据美国辐射保护和测量委员会统计，居民受到的核辐射82%来自天然源（55%来自氡，8%来自宇宙射线，8%来自岩石、土壤中其他放射性矿物，8%来自人体自身），18%来自人工辐射源（15%来自医疗、诊断用辐射源，3%来自其他人工辐射源）。由于氡是人体接受的最主要放射性辐射源，因此本章着重讨论与氡的辐射污染有关的问题。

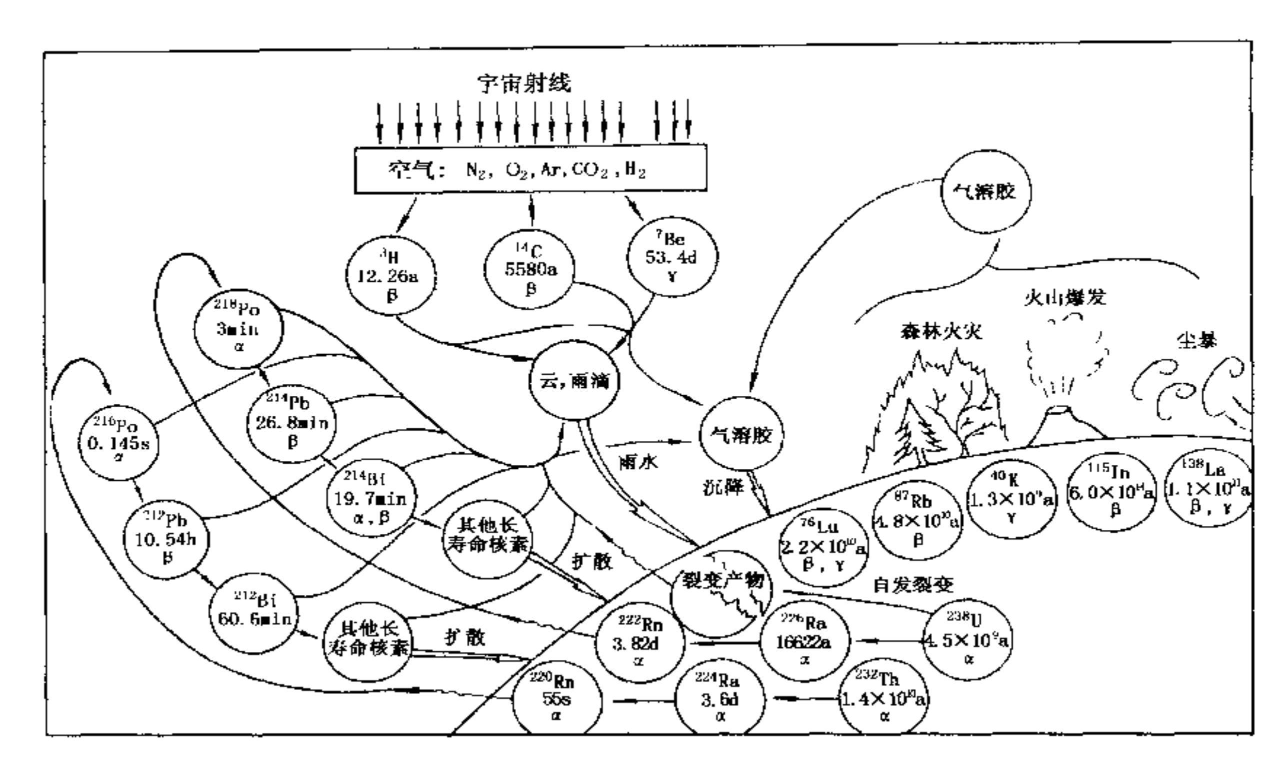


图 4－1　天然放射性核素在环境中的循环

第一节　生态环境中的氡、氡的危害及其监测问题

一、自然界中的氡及其对人类健康的危害

1．氡的物理及化学性质的一般表述

氡（^{222}Rn）或称氡气是一种无色无味的气体。氡的原子序数为 86，因而是最重的气体，密度为 9.73g/L（标准状态下），比空气重 7.5 倍，比氢气重 100 多倍，气体氡在 －61.8℃ 液化，在 －71℃ 凝成固体。氡是放射性元素铀（^{238}U 及^{235}U）、钍（Th）自然衰变的产物，同时氡本身也具有放射性：

^{238}U（铀）→^{226}Ra（镭）→^{222}Rn（氡）（半衰期 $T_{1/2}=3.824$d）；

^{232}Tu（钍）→^{220}Ra（镭）→^{220}Rn（氡）（$T_{1/2}=53.3$s）；

^{235}U(铀)→^{219}Rn(氡)($T_{1/2}=3.92$s)。

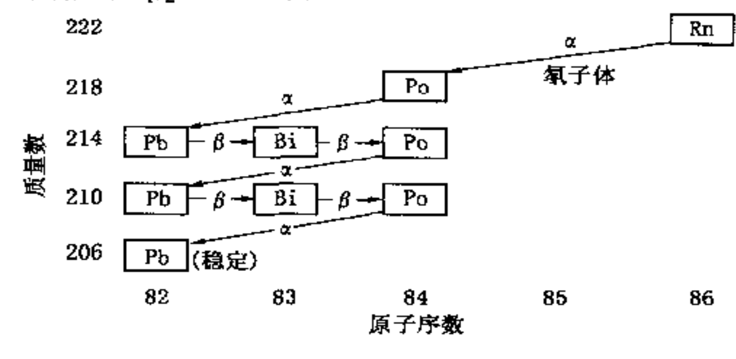


图 4－2　氡（Rn）的衰变过程

自然界有三种半衰期不同的氡同位素：

半衰期最长的是^{222}Rn，半衰期 $T_{1/2}=3.824$d，因从镭衰变产生又称镭射气；其次是半衰期 $T_{1/2}=51.5$s 的^{220}Rn，因从钍衰变产生，又叫钍射气；半衰期最短的是 $T_{1/2}=3.92$s 的^{219}Rn，因从锕铀（^{235}U）衰变产生，

又叫镭射气。由于自然界中^{222}Rn的半衰期最长，因此环境地球物理学科将主要研究^{222}Rn的特性和对人类生存环境的作用和危害。

^{222}Rn衰变时放出能量为5.486MeV的α射线后变成放射性^{218}Po（钋，$T_{1/2}=3.05$min），^{218}Po再发生α衰变生成放射性铅^{214}Pb（$T_{1/2}=26.8$min）；放射性铅再经β衰变生成短半衰期的^{214}Bi（铋$T_{1/2}=19.7$min），最后衰变成^{206}Pb（铅）的稳定同位素。

氡衰变生成的短半衰期放射性元素习惯上称为氡子体。氡子体的放射性特征见表4－2。

表4－2　氡子体的放射性体制

核　素	名　称	半衰期，min	放射性种类	辐射能量，MeV
$^{218}_{84}$Po	RaA	3.05	α	6.00
$^{214}_{82}$Pb	RaB	26.8	β	0.78
$^{214}_{83}$Bi	RaC	19.7	β	3.17
$^{214}_{84}$Po	RaC″	27.34	α	7.68

除上述三种同位素外，还有至少12种人工氡放射性同位素。由于自然界中的氡极为稀少，因此供医学和研究用的氡气样品是将放射性镭源放在充满水的玻璃容器中，然后再收集镭衰变产生的氡。氡在周期表上属零族，即惰性气体，化学性质安定。1962年确认存在氡与氟的化合物——二氟化氡，即氡与氦、氖、氪等没有与其他元素形成化合物的惰性气体不完全相同。

2. 氡对人类健康的影响

通过呼吸进入气管和肺的氡大部分被呼出，但弥散在空气中的氡会很快衰变成钋、铅、铋的放射性同位素，在被吸入气管和肺脏后，可附着在气管的粘膜上，或溶入体液进入细胞组织。这些放射性核素继续衰变放出的α、β离子可能破坏细胞组织，诱发癌变，尤其是致肺癌危险性极大。目前世界上公认氡是仅次于吸烟的诱发肺癌的第二位因素。约100年前德国的斯尼伯格矿区的肺癌发病率高，因此肺癌在德国最早称为“斯尼伯格病”。约半个世纪后，发现该矿区坑道的空气中氡的浓度达1000～5000Bq/m^3。20世纪50年代又发现一些国家的铀矿矿工肺癌发病率极高，和在铀矿坑道的空气中氡的浓度高有关。我国云南个旧锡矿矿工的肺癌发病率高也与矿区空气中重金属粒子和氡气浓度高有关。有研究认为，每年因吸入氡及其放射性衰变产物而致肺癌死亡的人数，美国为1.1～2万人，英国每年约有7千人，我国约有5.5万人。在室内氡的浓度为200Bq/m^{3}的环境中生活，相当于每天吸烟15枝。室内氡污染的特点是：长期性、隐蔽性和不易彻底消除。

美国环境保护署（EPA）1986年的研究认为：在氡浓度为7400Bq/m^3（记为1WL——工作水平）的环境中生活10年的人群中，每百人有14～42死于肺癌；若在氡浓度为740Bq/m^3（0.1WL）的环境中生活，氡的危害程度相当于每天吸两包烟，每百人中有6～21人死于肺癌；在平均寿命为70岁的人群中，若有75%的时间生活在氡浓度为148Bq/m^3（0.02WL）的环境中，则每百人有1～5人死于肺癌。美国环境保护署据此规定居民住宅空气中允许的氡浓度上限值。

我国江西某县的过村，供饮用的硅化灰岩中的井水氡浓度高达（7～11）×10^{3}Bq/m^3，儿童死亡率比不饮用含高浓度氡的井水的邻村汤村高21%。尤其是住在井边一位老年妇女一生生了18胎，死了13胎，应该说与长期饮用高浓度含氡水有关。

20世纪80年代以来，国家环保局和卫生部对我国主要大城市空气中氡的浓度进行了测量调查。表4－3为部分调查结果。

表4－3 部分城市室外空气中氡的浓度及氡子体的潜能

城市	样品数	氡的浓度，Bq/m³			氡子体潜能，10^{-8}J/m³		
		范　围	平均值	标准差	范　围	平均值	标准差（样品数①）
福　州	367	1.5～214.2	40.8	24.5	0.2～12.3	3.49	0.98
大　理	16	21.0～52.6	36.7	10.7	6.6～12.3	7.36	1.23
遵　义	38	2.6～121.7	28.9	13.6	0.37～32.71	9.36	3.76
昆　明	16	10.5～52.7	28.0	15.4	5.86～23.1	11.1	5.60
哈尔滨	2	17.0～20.0	20.0	4.2	2.10～9.60	8.11	0.74
韶　关	35	1.7～33.7	18.0	7.1	1.55～11.18	5.72	1.94（39）
临　汾	126	0.2～11.8	17.3	9.0	1.08～15.33	1.23	0.23（55）
伊　宁	21	2.9～66.6	16.5		3.03～23.56	9.13	（95）
贵　阳	51	6.3～26.9	15.7	4.5	1.71～7.7	5.01	1.64
广　州	25	6.8～26.5	14.5	1.8	2.36～8.70	5.08	1.84（29）
太　原	253	0.7～79.8	11.1	8.7	0.52～5.20	2.19	2.49（128）
大　同	127	0.5～52.1	11.1	8.7	0.73～6.38	1.92	2.23（78）
延　安	2	11.0～14.0	12.5	2.1	5.00～6.10	5.70	1.00
杭　州	31	1.8～11.0	8.1		1.85～3.78	2.00	（34）
拉　萨	50	1.5～29.2	7.0	7.6	0.42～5.11	1.54	1.54
沈　阳	10	2.9～8.0	1.1	3.1			
济　南	15	1.6～6.8	1.0	1.7			
青　岛	8	0.8～5.3	3.3	1.7			
武　汉	321				1.17～22.0	5.79	
包　头	319				0.15～24.49	5.05	

注：资料引自陈昌礼等：关于环境氡地质填图，地球物理科普文选第三集，地震出版社，1997年。
①样品数与氡浓度分析样品数不同时，在括号内注明。

从表4－3可见，室外空气中氡浓度最高的城市是福州、大理、遵义和昆明；室外空气中氡浓度最低的城市是青岛、济南、沈阳和拉萨。

从表4－4可见，室内氡浓度最大的城市是昆明、大理、哈尔滨和伊宁，其中昆明室内氡的浓度已经超过国际辐射防护委员会（ICPP）推荐的居民住宅内允许的氡浓度的上限值（150Bq/m³）。

由氡衰变产生的短半衰期放射性同位素（钋、铅、铋，在表4－2和4－3中称为氡的子体）是固态的，因而更容易被吸附在气管壁和肺泡上，并继续发生α、β衰变对肺部组织产生辐射，其辐射能量的大小，用子体的潜能（J/m³，即单位体积内氡的子体全部衰变成同位素^{210}Pb（铅）时产生的α辐射能）表示。显然氡子体的潜能越大，致癌的危险越大。国家规定，矿井空气中氡子体的最大允许潜能是6.4×10^{-6}J/m³（或4×10^{10}eV/L，换算时1m³＝1000L，1eV＝1.6×10^{-19}J）。

表 4-4　部分城市室内空气中氡的浓度及氡子体的潜能

城市	氡的浓度，Bq/m^3				氡子体的潜能，$10^{-8}J/m^3$			
	样品数	范　围	均值	标准差	样品数	范　围	均值	标准差
昆　明	16	32.6~644.6	170.8	176.4	16	7.2~138.7	15.5	11.6
大　理	8	22.3~191.6	92.6	53.9	8	4.9~20.0	13.1	7.1
哈尔滨	31	16.0~144.0	73.1	37.0	31	6.5~40.4	25.1	12.7
伊　宁	96	33.9~73.3	57.7		96	3.2~81.8	25.1	
临　汾	123	3.8~173.2	59.7	25.7	197	1.6~33.7	10.2	11.2
延　安	26	13.0~78.0	31.8	20.4	26	6.0~32.20	13.6	7.90
大　同	125	0.7~69.8	28.6	13.0	528	0.9~20.6	6.1	6.9
太　原	249	3.3~99.0	26.0	14.4	1010	0.3~25.8	6.5	9.1
杭　州	37	9.6~46.0	25.0		37	4.1~13.6	7.3	
	7	1.8~28.0	11.0		7	2.1~7.0	3.9	
武　汉					73	1.3~47.8	9.7	
韶　关	39	5.4~35.5	19.2		39	1.8~11.3	6.4	
长　沙	712	16.7~29.3	21.4					
广　州					29	2.6~9.1	6.3	
包　头					171	0.15~16.1	6.2	
沈　阳	46	10.5~21.3	14.0	3.5				
拉　萨	80	1.6~20.3	13.3	15.7	80	0.6~22.6	3.0	1.8
青　岛	8	1.3~16.6	7.6	5.3				
济　南	16	1.7~17.6	7.5	4.8				

注：资料引自陈昌礼等：关于环境氡地质填图，地球物理科普文选第三集，地震出版社，1997年。

近年还有研究表明，大气层中的磁暴往往伴随着大气层中带电离子数目的增加（有人称之为“电暴”），同时也使空气中氡的浓度急剧增加（称为“氡爆”）。有一种假说认为：太阳黑子的活动会引起地球磁场的变化，并使岩石和土壤由于磁致伸缩效应，将岩石和土壤孔隙中的氡挤入空气中（在实验室对花岗岩样品进行压缩时确实观察到氡逸出量的突然增加）。还有研究表明，在发生电爆和氡爆时，人体的脑垂体－肾上腺系统会受到影响，会引起心血管和神经系统的症状。

二、生态环境中氡的来源

1. 氡的地质来源综述

氡是人体接受最主要的放射性辐射源。空气中的氡来自^{238}U（铀）、^{226}Ra（镭）的衰变，而铀、镭主要来自地质体：岩石、土壤、地下水，地球深部的放射性元素及其衰变产物也可能延断裂逸出到地面。地壳中铀的丰度为2.8ppm，自然界的U是^{238}U（占99.275%，$T_{1/2}$＝45.1亿年）、^{235}U（占0.720%，$T_{1/2}$＝7.13亿年）、^{234}U（占0.0054%，$T_{1/2}$＝24.7万年）的混合物。已发现的含铀矿物约480种，其中有实用价值的约25～30种，主要的铀矿物有晶质铀矿变种沥青铀矿、水硅铀矿（铀石）、水斑铀矿（铀黑）、钛铀矿、铀钒钙矿、钒钾铀矿、钙铀云母、铜铀云母等。工业铀矿床的含铀品位为0.1%～0.2%。但一些含铀品位较低的矿产资源也受到重视。例如，磷酸盐矿，平均含铀0.01%，估计铀储量600万t；页岩，

平均含铀 0.015%，估计铀储量 1000 万 t；花岗岩，含铀 25ppm，估计铀储量 3000 万 t；海水中估计铀储量 40 亿 t。各种不同的岩石和土壤中铀的丰度差别颇大。

表 4－5　部分岩石和土壤中铀的丰度

岩石种类	铀丰度平均值，g/t	铀丰度变化范围，g/t
超基性火成岩	0.003	
基性火成岩	1.0	0.2～4.0
中性火成岩	1.8	
花岗岩类	3.0	1.0～7.0
页　岩	3.7	1.5～5.5
砂　岩	0.5	0.2～0.6
碳酸岩盐	2.2	0.1～9.0
蒸发岩	0.1	
土　壤	1.8	
煤	1.0	

铀在各种岩石矿物中分布的规律是：在火成岩中，铀含量随 SO_2 含量增加而增高，因此在 SO_2 含量高的花岗岩中，铀含量高。在沉积岩中，含铀矿物是被吸附在岩石颗粒表面上，因此颗粒细的泥岩、页岩，沉积环境中富含有机物、碳质、磷矿物的岩石含铀丰富。氡易溶于水，因此在邻近富含铀的矿物、岩石附近的地下水中，氡的浓度高。岩石或土壤中的铀衰变成氡，进入大气的平均析出率为 0.016Bq/（m^2·s）。在岩石的断裂带上，氡可沿断裂面析出，相当于增加了氡从岩石或土壤中析出的面积，因此断裂带上方空气中氡的浓度偏高。若断裂带富含地下水，又会增加其上方空气中氡的浓度。

在地表附近的空气中，普遍含有氡及氡子体，但每立方米空气中每秒发生的衰变次数仅为 10 次以下（即浓度仅为 Bq/m^3 数量级），表 4－3 的数据表明，中国部分城市空气中氡浓度平均值为 3.3～40.8Bq/m^3，居民住宅内氡浓度平均值为 7.5～170.8Bq/m^3。国际辐射防护委员会（ICPP）推荐的居民住宅内空气中氡的最大允许浓度是 150Bq/m^3（0.02WL）。美国环境保护署规定，室内空气中，氡的浓度超过 148Bq/m^3，就应当采取治理措施。俄罗斯联邦政府规定，新建房屋室内氡的浓度应低于 100Bq/m^3，现有房屋室内氡的浓度应低于 200Bq/m^3，若室内氡的浓度高于 400Bq/m^3，而无法降低，则居民应迁出。在我国，规定室内氡的浓度标准为：已建住房氡的浓度不超过 200Bq/m^3，新建住房不超过 100Bq/m^3（GB/T16146—95）。

地下水是氡又一来源。这是由于在地壳中产生的氡易溶于水并在水中富集。在美国，地下水中氡的浓度一般都低于 7400Bq/m^3，但在缅因州，某些地下水井中氡的浓度甚至高于 370000Bq/m^3。在家庭用水中氡的浓度为 370000Bq/m^3 时，会使室内空气中氡的浓度增加 30Bq/m^3。家务用水，如淋浴、洗涤等增加水扰动，增加了氡进入空气的机会，烧热水也能加速水中氡向空气中的逸散。

在通风不良的矿井中，氡浓度可达 1000Bq/m^3 数量级；在铀矿井中，氡浓度甚至可达 100000Bq/m^3。国际辐射防护委员会推荐的矿井空气中氡的最大允许浓度是 400Bq/m^3。我国目前规定的矿井中氡的最大允许浓度是 3700Bq/m^3（0.5WL，或 10^{-10}Ci/L，换算时 1 居

里 = 1Ci = 3.7×10^{10}Bq，1m^3 = 1000L)。

2. 氡污染的其他来源

前已述及，磷酸盐矿中铀的丰度可达 0.01%。农用磷肥主要用磷酸盐作原料，因此磷肥中的铀等放射性核素的含量颇高，所以，施用磷肥的土地成为氡源。有研究认为，全球每年由于施用磷肥而释放到大气中的氡约 10^{13}Bq。

煤是工业和民用的重要燃料。煤中铀的丰度约 1.8g/t 以上，燃烧后，铀往往集中在煤烟（煤灰）上，成为新的氡源。据估计，每年由燃煤释放到大气中的氡约 10^{13}Bq。有调查表明，我国北方某些农村中，居民头发中放射性^{210}Po（钋）的含量比对照组高 50 多倍，这说明以煤为主要燃料的北方农村，燃煤中放射性元素的影响不可忽视。天然气中一般含一定量的氡，其浓度平均值为 740Bq/m^3。但由于天然气成藏的地质条件不同，其所含氡的浓度亦可能不同。例如美国得克萨斯的天然气中，氡的浓度达 1850Bq/m^3。

近年来发现在用花岗岩类石材装修的房屋内，氡的浓度偏高，这是由于花岗岩，特别是酸性花岗岩（SO_2 含量高）中铀的丰度高所致。

在多数情况下，居民住宅室内空气中的氡 90%来自房屋地基的土壤和岩石（因此地下室内氡的浓度要比一、二层楼室内氡的浓度高 2～3 倍），8%～9%来自家庭自备井井水，1%～2%来自建筑材料。建筑材料中的氡来源于制造水泥的原材料，如用掺有粉煤灰的原料制造的水泥，用含有明矾的页岩制造的加气混凝土，建筑用石材等。

3. 国内外部分地区氡浓度异常的案例

前已述及，室内氡的主要来源是是地基的岩石或土壤，约占进入室内的氡的总量的 90%。据抽样调查的结果，美国约有 12%的房屋室内空气中氡的浓度超过美国环保署提出的标准（148Bq/m^3 或 4pCi/L，1pCi = 10^{-12}Ci，1m^3 = 1000L）；加拿大有 5.6%的住宅空气中氡浓度超过 400Bq/m^3；德国有 3%的住宅室内空气中氡浓度超过 300Bq/m^3。像瑞典这样重视环境保护的国家，室内空气中氡浓度超过 148Bq/m^3 的房屋甚至占调查总数的 81%。我国卫生部放射性卫生监督检测所调查所 1994 年以来曾对 14 个城市的 1524 幢住宅和写字楼进行调查，发现有 6.8%房间室内氡气超标，室内氡浓度最高值约是规定标准的 6 倍。

表 4-6　一些国家住宅内空气中氡浓度的抽样调查结果

国　家	抽样调查数目	氡浓度最大值，Bq/m^3	超过 148Bq/m^3 的比例，%
加拿大	546	1258	21
瑞　士	634	26973	62
挪　威	293	10656	58
意大利	67	2220	28
瑞　典	47072	42180	81

注：资料引自崔霖沛等：环境地球物理方法及其应用，地质出版社，1997 年。

调查空气中氡浓度高的区域，首先是调查地壳中铀的丰度比地壳中铀丰度平均值（2.8g/t，克拉克值）高 2.5～10 倍的区域。这些区域是铀矿和邻近铀矿的区域，花岗岩、片麻岩、流纹岩、安山岩、碳质页岩分布的区域，断层、断裂带、岩溶发育、有滑坡体存在的区域，在断裂带附近地下水活跃的区域。要说明的是，在花岗岩中铀含量的变化范围很大，在不同地区、甚至同样地区的不同地点，铀含量变化范围也相当明显。另外，花岗岩中

铀的浓度还与侵入年代、风化程度、裂缝发育程度有关。总之，地质原因是影响空气中氡浓度的最重要因素。

奥地利的 Umhausen 地区被调查地 90 处房屋中，有 71% 的房屋冬季（通风较差）室内空气中氡的浓度高于 400Bq/m^3（该国要采取行动进行治理的氡浓度值），最高的甚至达 274000Bq/m^3。该区既无铀矿，也没有大断层。氡浓度高是由于该区有滑坡体存在，使花岗片麻岩发育、破碎，致使氡从富含铀的花岗片麻岩中逸出。

在美国宾夕法尼亚州，有几座建筑在断裂发育、风化强烈的花岗岩块上的房屋，室内氡的浓度达 4000Bq/m^3，房屋地基下面土壤中氡的浓度甚至达到 100000Bq/m^3。另外还发现建在风化破碎的灰岩上的房屋，室内氡的浓度也高达数万 Bq/m^3。美国居民住宅中相当一部分有自备水井，采用地下水，因此对地下水中氡的浓度格外重视。对美国的北卡罗来纳州 270 个地下水点的调查表明，有 41% 的地下水中氡的浓度超过 37000Bq/m^3。花岗岩带地下水中氡的浓度最高，最大值可达 3700Bq/m^3；变质岩和中性火山岩带地下水中氡的浓度中等；铁镁质火山岩带地下水中氡浓度较低；第四纪含水层氡的浓度最低。

在英国苏格兰地区北部，在对土壤中氡的测量调查发现，穿过背斜构造时，在泥岩（铀的丰度为 8～35g/t）上方比灰岩（铀的丰度为 2～10g/t）上方氡的浓度高得多。另外，还发现室内空气中氡的浓度和地下岩石中铀的丰度有关（见表 4－7）。

表 4－7　地下岩石中铀的丰度和室内空气中氡的浓度关系对照

岩石中铀的丰度，g/t	0.6	0.8	1.0	1.1	1.2	1.3
室内空气中氡的浓度，Bq/m^3	12～24	10～60	15～70	10～80	10～90	10～100

我国是新构造运动强烈和断裂构造发育的国家，含铀、镭的花岗岩、黑色页岩、变质岩、含铀磷块岩和石灰岩岩溶分布甚广，因此有存在空气中氡浓度高的危险区域的可能。我国曾对青岛面积为 32km^2 的市区土壤中的氡含量进行过调查。青岛在郯庐断裂的东侧的青岛断裂带以东，市区在崂山花岗岩岩体西南，为第三纪侵入岩体，岩性为细粒钾长石花岗岩，SO_2 含量达 34.82%。根据对 14 个土壤样品中铀含量的分析，铀的丰度为 2～6g/t，平均值为 3.86g/t，大于地壳中铀丰度的平均值（2.8g/t），但小于花岗岩中铀丰度的平均值（4.7g/t）。调查发现，青岛市区土壤中氡的浓度总体上不高，14 个样品中仅有 5 个高于 4000Bq/m^3，而且土壤中氡异常值高的区域与已知断裂位置重合。

我国一些温泉中富含氡，已经测定的三个温泉的氡的浓度是：广东珠海，1124Bq/m^3；福建宁德，1470Bq/m^3；山东新泰，800Bq/m^3。

我国的江西、安徽、湖南、湖北等省石煤资源丰富，但石煤中放射性核素含量过高，例如江西上饶地区石煤中镭的后来放射性当量达 1700～1900Bq/m^3。据在当地用石煤煤渣制砖建造的房屋内，空气中氡的浓度达 261Bq/m^3，超过了国际上推荐的居民住宅空气中氡浓度的上限标准。研究还表明，在由含放射性矿物的石煤煤渣砖建造的房屋内，伽马射线吸收的剂量要比对照组房屋内高约 6 倍。

我国云南省的个旧是著名的“锡都”，矿区发现远在汉代，明成化元年（公元 1465 年）已开始开采经营；清宣统二年（1910 年）滇越铁路通车，当年出口锡锭 6195t；1934 年经营性的采矿工作面有 4425 户，矿工 5 万多人。新中国建国后，扩大了地质勘探，探明地质储量居世界第一。1950～1980 年出口锡锭约 40 万 t，设在个旧的云南锡业公司（云锡）的

产品锡锭被称为“大锡”，是国际公认的免检商品。但个旧也是受氡害最严重的区域。从1954～1994年，矿工中有病案可查的肺癌患者达2492人，其中有10年以上矿坑工作史的为2117人，占85%。40年间平均每年死于肺癌的矿工达58.6人。云锡矿工肺癌发病率最高年份为247.59/10万。据估计，云南锡业公司约还有3000人由于长年在矿井中工作，受到氡辐射的剂量超过国际认定的氡致肺癌标准（600wLm），由于肺癌的潜伏期长，可达20～35年。因此可认定在1995年以后的15年内，矿工的肺癌发病率或死亡率将为每年95～120人！另外，个旧城区居民的肺癌发病率也很高，连续4年城市居民（不包括云锡工人）肺癌的检出率为：116/10万～364.81/10万，4年平均检出率为271.2/10万，已经有成为地方病的趋势。

个旧城区在地质学上有两个特点：一是断裂遍布，共有东西、北东、北西、南北方向的四组断裂，将岩层切割得支离破碎，使岩层中各种构造裂缝发育，形成氡的良好运移、贮存通道；二是城区地表以下500m处有大片花岗岩岩体，这些花岗岩中铀和钍的丰度比世界同类岩石中铀和钍的丰度高几倍至几十倍。在地形地貌上，个旧城市区是四周隆起、中间凹陷的槽谷，在城市出现逆温现象（对流层高空温度高于低空）时空气中的污染物不易扩散。地表出露的三叠系个旧统厚层石灰岩中岩溶发育，溶洞、岩溶洼地、暗河随处可见。由于多年采矿，岩体机械破碎作用强烈，这些都是氡逸出和积存的地质条件。

表4-8　个旧地区花岗岩中铀（U）和钍（Th）的丰度

岩石类别，采样地点	U的丰度，g/t	Th的丰度，g/t
花岗岩，老厂	17.20	47.90
花岗岩，卡房	21.40	25.40
花岗岩，马拉格	30.00	27.80
花岗岩，松树脚	19.30	52.70
世界花岗岩平均值	3.0	8.50

由于特别的地质条件，个旧城市地区居民住宅内氡的浓度普遍偏高，绝大部分住宅室内氡的浓度超过国际公认的居民住宅室内空气中氡浓度的上限值（150Bq/m^3）。居民点靠近断裂带、花岗岩露出区，以及岩石破碎强烈和陡崖陡坎处，居民住宅室内空气中氡的浓度都高。

表4-9　个旧城区居民住宅内氡（Rn）的浓度

地质测线编号	地区及调查户数	室内氡浓度，Bq/m^3
Ⅰ	个旧市区，88户	471.9
Ⅰ	卡房矿区，14户	480.4
Ⅰ	水头地区，14户	127.0
Ⅱ	全线，13户	312.4
Ⅲ	全线，16户	279.9
Ⅳ	全线，12户	517.3
Ⅴ	线上，2户	7389.5

由于个旧锡矿除了生产锡及锡制品外还生产粗铅、精铋、白钨精矿、高纯铟、白砷、硫精矿等。因此土壤中有害重金属的含量偏高。这些有害元素被人体摄入，将威胁人体的健康，破坏人体的免疫系统，实际上加剧了氡的致癌作用。

表 4-10　个旧地区土壤部分重金属的含量

元素名称	含量范围，ppm	平均值，ppm	世界土壤中的平均值，ppm
As	11.0～2791.4	111.5	6
Be	0.71～230.3	9.5	0.01～40
Cd	0.08～7.80	0.58	0.35
Ga	0.00～316.2	72.24	30
Pb	0.50～14304.5	221.45	10～80，平均 25
Sb	0.00～68.73	22.60	0.2～10，一般<5

注：有关个旧的资料引自：《云南地球物理文集》（二），云南大学出版社，1997 年。

三、对空气中氡的浓度进行区域评价的方法问题

氡气灾害是一种分布广泛的灾害，但氡气灾害的发生有一定的地质前提，这就是氡是铀—镭衰变的产物，因此查明氡浓度大的区域，首先是要查明铀—镭丰度高的区域。此处，“铀丰度”并非指形成铀矿的区域，而是地层中铀的丰度是地壳中铀的丰度平均值（2.8g/t）2.5～10 倍的区域。因此，对空气中氡的浓度进行区域评价的步骤是：

（1）用航空 γ 能谱测量结合航空磁测、航空电测、地面 γ 测量及车载 γ 测量测量，查明 γ 辐射异常的区域，据此做出铀分布异常的平面图。航空磁测有助于查明有磁性的花岗岩分布区域，航空磁测有助于查明含铀页岩分布区域。

（2）从铀分布异常的平面图上选出铀含量高的异常区域，结合地面 γ 测量和车载 γ 测量以及地质—地球物理资料，查明断裂发育带（尤其是活动断裂带）、岩溶发育地区和地下水活跃地区，作为进一步地面勘测的目标区。

（3）在目标区内布列若干剖面，在剖面上选定一定数目的测点（如测点距离可选为 300m），进行地面 γ 能谱测量以及土壤和空气中氡含量测量，确定氡浓度高区域的范围。

要说明的是环境中的氡测量和对全国进行氡的地质填图固然是 21 世纪地质填图的重要工作内容。但在目前条件下，全国普遍进行土壤中氡测量和室内空气中氡的测量，则是成本高又费时的工作。因此应该有选择的先在一些地区进行氡的区域调查和地质填图。

在地质勘探中曾经普遍使用测量氡的浓度以确定岩石、土壤中氡的浓度以解决某些地质问题，如铀矿普查，在活动断层上方根据氡的浓度异常预测地震，根据氡的浓度异常查明矿井、坑道附近的断层等问题。由于岩石、土壤中氡的浓度要比空气中大 3 个数量级，因此和其他勘探地球物理方法和仪器一样，用于放射性勘探的仪器设备在用于空气环境检测时，灵敏度不够。目前，我国环境部门进行氡测量所用的方法是对测定空气中悬浮颗粒物时所用的滤料阻留法稍加改造成的双滤膜法。其所用设备的示意图如图 4-3 所示。

图 4-3 中 6a 为入口微孔滤膜，是醋酸纤维素交联成的孔径细小、分布均匀的薄膜，在抽气机通过抽气口抽气时，被检测空气中的氡子体（金属钋、铅、铋的气溶胶）被阻流在薄膜 6a 上；通过入口薄膜 6a 的空气中所含的氡将继续发生衰变，所产生的氡子体将被阻留在出口滤膜 6b 上，测定薄膜 6b 上的 α 辐射活度，即可测定在薄膜 6a、6b 间空气中氡的浓度。

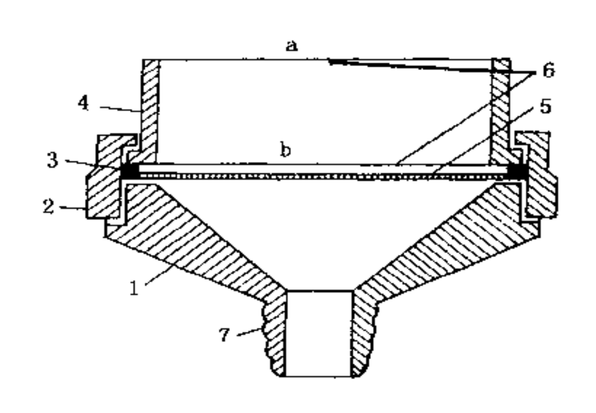


图 4－3　测定氡含量的采样设备

1—底座；2—紧固圈；3—密封圈；4—接座圈；5—支撑网；6—滤膜；7—抽气口

另外一种方法是活性炭吸附法。该方法的要点是由干燥管、活性炭吸附管和抽气系统组成的采样器，在被分析的气样通过活性炭吸附管时，氡被吸附在活性炭上。在采样结束后，将活性炭吸附管放在解吸炉中，加温到 350℃，使氡解吸。将被解吸的氡导入电离室，由于氡的 α 衰变使空气电离，用经过校准的静电计测定所产生的电离电流，即可计算出被测气样中的氡的浓度。

测定土壤中氡的含量的方法原理是，用倒置的杯状容器（称为径迹杯）埋在土壤中，埋杯深度一般为 40cm。杯口用滤膜封闭，由于杯内外存在氡的浓度差，而土壤中氡的浓度始终是高于杯内空气中氡的浓度，因此土壤中的氡将以扩散的方式进入杯内。杯内放置硝酸纤维、醋酸纤维或聚酸酯的固体探测器，在氡衰变放出的 α 射线将会在固体探测器（如醋酸纤维）上留下损伤（烧痕）径迹。在经过一定时间后（集气时间，可以是几个小时到一个月），回收径迹杯，用化学或电化学蚀刻方法将径迹扩大，再用光学显微镜读出径迹的密度，既可换算出进入径迹杯的氡的浓度。这种方法是一种累计测量方法，测量结果要和经过标定（刻度）的结果比较，才能给出氡浓度的读数。还要注意的是，在一年四季中土壤中氡的浓度是变化的：夏季偏高，冬季偏低，春秋季比较稳定，因此野外作业在春秋两季进行为佳。

有关测定氡子体以及土壤中氡的方法和仪器设备的进一步资料，可参阅有关环境监测方面的著作。

第二节　放射性污染

地球的岩石圈中含有约 29 余种放射性核素，最主要的是：^{40}K（钾，半衰期 $T_{1/2}=1.26\times10^9$ 年），^{232}Th（钍，$T_{1/2}=1.39\times10^9$ 年）^{238}U（铀，$T_{1/2}=7.1\times10^8$ 年）。这些天然放射性元素由于在人类生活环境中含量极少，一般不会对人体健康产生影响。放射性污染是指人类活动排出的各种放射性核素产生的放射性，使环境的放射性水平高于天然背景值或国家规定的标准。放射性污染物的放射性与其化学状态无关，每种放射性核素都有一定的半衰期（$T_{1/2}$），并放射有一定能量的射线。除了发生核反应，任何物理、化学、生物化学处理都不能改变放射性核素的核辐射特性。人类活动产生和排出的放射性污染物（如核电站产生的核废料）可污染空气、水体和土壤。在空气和水体中放射性污染物可由于流动、扩散而被稀释。但有某些生物对某些特定的放射性核素有富集作用。例如牡蛎肉中的^{65}Zn（锌）同位素的浓度可能比周围海水中的浓度高 10 万倍。空气、水和生物中的放射性核素可通过多种渠道进入人体，使人受到放射性伤害。

一、放射性污染物的来源

核工业是 20 世纪发展起来的新兴工业。从 20 世纪 40～50 年代兴起的核武器研制到 20 世纪后半期的核能和核技术和平利用形成产业，在核能发电、核能供暖、辐射加工、核辐射医学治疗、同位素示踪检测方面都有发展，并起重要作用（如核医学的各种放射性同位素在

癌症治疗上挽救了许多人的生命)。1960～1985 年各国核技术的经济效益约 800 亿美元，20 世纪 80 年代，全世界核技术产业的总产值约为世界各国国民经济总产值的 0.5%。

核技术和核工业的发展也会带来放射性污染，污染物来源是核工业（从铀矿的开采到提炼、加工）、核电站、核燃料后处理厂及核试验。

铀矿开采过程中产生的放射性粉尘，矿石中释放的氡气，都将进入空气。铀矿和其他放射性矿物的矿井中的选矿废水、废渣、尾矿都会对水体和土壤产生污染。铀矿在进行提炼时采用湿法冶金工艺，因此产生含放射性物质的废水（每吨铀矿石提炼时少的产生 0.4～0.8m^3 废水，多的产生 2.5～5.5m^3 废水)，提炼铀后的废渣都是重要的放射性污染物。天然铀矿石平均品位为 0.2%，一座功率为 100 万 kW 的核电站每年约需要 150t 铀，相应将残留 75000t 以上的尾矿（矿渣)，其中仍有 0.01%～0.04%铀，还有部分镭，同时还有氡气。

核电站在正常运行过程中总会产生一些放射性污染物，如^{131}I（碘)、^{3}H（氚）等，其产生量与核电站的功率、类型、运行情况有关。通常在核电站正常运行时，对周围居民点的放射性污染轻微，一般不超过背景值的 1%。但在核电站发生事故时所产生的污染及其后果则十分严重。1957 年 10 月 8 日英国温兹凯尔石墨气冷反应堆发生堆芯融化事故，泄漏出 ^{131}I20000Ci（居里，放射性活度单位，1 居里即放射性源每秒钟发生 3.7×10^{10}次核衰变时的活度，1g 镭 1s 发生核衰变的次数即 3.7×10^{10}次，因此 1g 镭的放射性活度为 1Ci)，^{132}Te（碲）12000Ci，^{137}Cs（铯）600Ci，^{89}Sr（锶）80Ci。严重影响了周围地区，并影响欧洲大陆，使周围约 700km^2 地区内牛奶中^{131}I（碘）高达 1.4μCi/L，在短时期内不能食用。

核燃料后处理厂是放射性污染物又一重要来源。核燃料后处理厂是将反应堆辐照元件进行化学处理，提取钚和铀再度使用，排出的放射性污染物是反应堆裂变的产物（还有少量的超铀元素)，其中一些是半衰期长、毒性大的核素，如^{90}Sr（锶)、^{137}Cs（铯)、^{239}Pu（钚)。核燃料后处理厂的含少量放射性物质（10^{-3}mCi/L 以下）的废水，可在经过蒸发、离子交换、絮凝沉淀后排出。而含放射性物质较多（10^{-1}mCi/L 以上）的废水，则要在蒸发浓缩后用水泥或沥青将其固化后封存。世界上核废料污染最严重的地区是美国汉福德钚生产中心。该中心从 20 世纪 40 年代开始生产^{239}Pu（钚）以来，一共建成 9 座反应堆和 5 座加工厂，几十年来在生产了大量核燃料的同时，积累的^{137}Cs（铯)、^{90}Sr（锶）等放射性核素达 21.5 亿 Ci。这些核废料封存在 149 个单壁罐和 28 个双壁罐中。149 个单壁罐中有 67 个发生泄漏，造成土壤的污染。此外还向地面排放了 5×$10^8$$m^3$ 含放射性物质的废水，其中含钚约 200kg，含铀约 10 万 kg，经过衰变，1972 年，β放射性核素仍残存 20 万 Ci。这些放射性污染物最后都进入水体和土壤。我国从 20 世纪 60 年代开始发展核技术以来，也积储了相当数量的核废料。80 年代随核技术的应用范围扩大和用户增加，在各省、市、自治区陆续建立放射性废料库，到 2001 年上半年为止，全国已经建立了 25 个放射性废料库，收贮各类放射性源 1.3 万多个，放射性垃圾 7000 多 m^3。

以研制和改进核武器为目的的核试验是放射性污染的又一重要来源。核爆炸瞬间产生穿透性很强的中子辐射和γ辐射，同时产生大量放射性核素。所产生的放射性核素可为裂变产物，未发生核反应的剩余核装料，此外核爆炸时产生的中子辐射能使周围的某些稳定核素活化，产生新的放射性核素。由于核爆炸时产生的高温和蘑菇云，放射性颗粒可在几小时至一天内沉降在爆心周围几百公里的范围内（近期沉降)，还有一部分随蘑菇云到对流层顶部，进入平流层随大气环流流动并重新进入对流层，造成全球性的污染。1970 年以前，全世界大气层中的核试验后进入平流层的放射性^{90}Sr（锶）有 1550 万 Ci，其中 1500 万 Ci 已经沉降

到地面。核工业的后处理厂，每年排放的^{90}Sr（锶）一般都在居里级，即使世界上放射性废料排放量最大的英国温兹凯尔后处理厂，每年放射性锶的排放量也只是千居里级，排放量最大的1971年为12300Ci。表4－11是核试验时产生的主要放射性核素及其对人体的伤害部位。

表4－11 核试验时产生的放射性核素

放射性核素	来 源	辐射类型	半衰期	有效半衰期①	伤害器官
^{89}Sr	裂变产物	β	50.5d	50.4d	骨骼
^{90}Sr	裂变产物	β	27.7a	17.5a	骨骼
^{137}Cs	裂变产物	β、γ	30.5a	70～138d	全身、肌肉、肝脏
^{131}I	裂变产物	β	8.05d	7.6d	甲状腺
^{14}C	次生活化	β	5560a	12～40d	骨骼、脂肪
^{239}Pu	残余核装料，^{235}U与中子反应产物	α、γ	24400a	80～200a	骨骼、肝脏
^{140}Ba	裂变产物	β、γ	12.8d	10.7d	骨骼
^{144}Ce	裂变产物	β、γ	290d	290d	骨骼

①有效半衰期是放射性核素进入人体后，由于新陈代谢和放射性衰变使人体内放射性核素减至一半所需要的时间。

放射性污染物会对空气、水体、土壤产生污染，通过各种生物链，对生物群的发育、遗传发生作用。含放射性污染物的气体进入空气后，其稀释、输送过程受气象、地形和放射性污染物本身的影响。核试验的沉降物、核工业排放的废水、封存在地下的核废料的泄漏都可能对地表水体、地下水产生污染，并可能污染水流流经的地面而污染土壤。

二、放射性污染对人类健康的影响

放射性污染物通过食物链经消化系统和通过呼吸进入人体（通过皮肤吸收的可能性很小），可对机体持续照射，直到放射性核素衰变为稳定核素或通过新陈代谢被完全排出体外为止。

人体受某些微量的放射性核素照射时（包括体内照射和生活环境中的照射），对健康并无影响，只有照射达到一定的剂量时，才可能对机体产生某些伤害。当体内的放射性照射剂量超过人体能承受的限度时，可能出现头疼、头晕、食欲下降、睡眠不好等近期症状，继而会发生白细胞、血小板减少等中期症状，超剂量、长期的体内照射，可能诱发癌症（包括白血病）、遗传障碍等严重症状。

放射性污染物中^{90}Sr（锶）和^{137}Cs（铯）是对人体危害较大的，半衰期长的放射性核素。放射性锶的化学性质与钙的稳定同位素类似，而且和钙一起参加骨骼组织的生长和新陈代谢。放射性铯在化学性质上与钙和钾的稳定同位素相近，在人体内也和钙、钾一样沉积在同一部位。1945年8月，原子弹在广岛和长崎爆炸后，当地居民受到核辐射远期效应的影响，肿瘤、白血病的发病率明显提高，引起人们对放射性污染导致的疾病的重视。1954年以后核试验次数增加，也使人们警惕放射性污染物对生态环境的破坏。

原苏联的塞米帕拉金斯克核试验基地（在哈萨克斯坦境内）是世界上最大的核试验场，面积达85000km^2，有118个地下坑道和13个钻孔孔眼，从1949～1989年共进行过470次核试验，其中100次是地面核试验。从1949年起，在基地下风向200km外的居民陆续出

现一系列“怪病”：婴儿畸形（缺胳臂、少腿），成年人癌症发病率增加；另外当地的狗不断掉毛。该基地在 2000 年 7 月 29 日被销毁，附近居民受到辐射伤害的真相才进一步为人所知：核爆炸的放射性尘埃可飘飞到数千千米外，至少有 100 万人受到轻重不同的核辐射污染。

近年来，医用和工业用放射性源丢失造成放射性伤害的案例多次发生。1955～1979 年，在全世界范围内，每 5 年由于放射性源丢失的事故为 10～25 起，受到照射的人数为 30～70 人/5 年；1980～1989 年的十年间前 5 年发生丢失放射性源事故 25 起，后 5 年发生 15 起，受到照射的人达数千人，其中 550 人受照射的剂量已经达到生物危害水平。其中最引起关注的两起是：1983 年 11 月在墨西哥的 Juarez，一台报废的 ^{60}Co 治疗机被窃，拆开后当废品出卖，其机头内有 6000 枚 1×1mm 的 ^{60}Co 金属片（每片的放射性活度为 2.8GBq，其总放射性活度达 16800GBq（16.8TBq，即每秒钟发生 16.8×10^{12} 次核衰变；$1T=10^3G=10^6M=10^9K=10^{12}$）。在送往旧货场途中约有 700 枚 ^{60}Co 金属片撒在车厢内和路途上（后来找回 60 枚）。其余大部分被送往钢铁厂并最后被轧成钢材，销往墨西哥和美国。直到 1984 年 1 月 16 日，一辆载有这种含放射性污染物的钢材的卡车因迷路停留在美国 Los Alamos 国家实验室门口问路时，实验室门口的辐射探测器接收到放射性射线，警报声大作，从而引起对该卡车的注意，追踪该卡车到钢铁厂，才发现了放射性污染物的来源。1984 年 3 月用航空放射性探测方法对美国西南部和墨西哥的 679km² 区域和 720km 的高速公路进行检测，共发现 43 个放射性辐射异常点；还发现 3000 个活动餐桌的桌腿及 7000t 建筑用钢筋或其他钢材中含放射性污染物，还发现有 17600 栋房屋使用了有放射性污染的钢材（后来有 814 栋因此被拆毁）。为拆毁含放射性污染物（钢材）并选地储藏，共处理了 16000m³ 废土和炉渣，以及 5000m³ 其他材料。事故发生后的 2 个月中，有 5 人受照射剂量 3～7Sv，80 人约 0.25Sv，720 人约 0.005～0.25Sv，3200 人<0.005Sv，未发生死亡病例。

另外一例是 1987 年 9 月 13 日在巴西 Goiania，一台 ^{137}Cs 治疗机从一家部分被毁损的癌症治疗中心运到废品站。因机内还有 52TBq 的 ^{137}Cs，因此机头发蓝光，废品站主人误认为有贵重物品，因此用大锤将装有氯化铯粉末的不锈钢桶砸碎并带回家中。家庭成员和亲友纷纷来观赏这种发蓝光的金属粉末，有的还被亲友作为赠品带回。这种传播持续了半个月，先后有多人发病，其中 10 人因病情严重住院，并先后有 4 人死亡。但一直不明死亡原因。到 9 月 23 日一位外地来的医生提出用辐射仪器检查，发现死者遗物中放射性污染严重，这才开始有组织的收容和救治：有 600 余人接受了放射性计数器的全身检查，查明体内 ^{137}Cs 大于 1MBq 者 60 人，大于 0.01MBq 者 87 人，先后有 24 人住院，8 人查明是急性放射性病，其中受照射 4.5～6.0Gy（Gy——中文名为戈瑞，吸收放射性射线剂量的单位，1Gy＝1 戈瑞为 1kg 生物组织吸收了 1J＝1 焦耳的辐射能量时，该生物组织的吸收剂量）者死亡。

在中国，20 世纪 60 年代就有类似案例：1963 年 1 月 11 日安徽合肥地区一名儿童将辐射植物种子用的源强为 0.37TBq ^{60}Co 源带回家中，9d 后才被追回。家庭成员 6 人均受到辐射，其中接受照射剂量为 $80G_y$ 及 $40G_y$ 者分别在 9d 和 10d 后死亡。另外到该家探访的 43 人也受到照射，其中接受照射剂量 0.01～1Gy 者 16 人。

要指出的是近年来，核试验次数已经明显减少，除了在核工业基地附近核辐射略高外，一般居民区的核辐射污染程度都十分轻微。但近年来，由于室内装修使用材料不当（例如使用某些放射性辐射背景值较高的花岗岩，尤其是红色花岗岩），可能使室内的辐射值略高。

在受到非核爆炸的放射性辐射时，人体因接受到是放射性辐射的剂量不同而产生不同的反应。表 4－13 是人体接受放射性辐射照射后的后果。

表 4-12　广岛核爆炸①后距爆心投影点不同距离处的人员死亡率

距爆心投影点距离，km	死亡率，%	即时死亡率，%
0～0.5	98.4	90.4
0.6～1.0	90.0	59.4
1.1～1.5	45.0	19.6
1.6～2.0	22.6	11.1
0～2.0 累计	56.5②	32.0

①爆炸时间 1945 年 8 月 6 日 8 时 15 分，爆炸当量 1.25 万 tTNT，爆心高度 570m。
②其中死亡于辐射损伤者占 28.6%，死亡于烧伤者占 15.3%，其余死亡于机械性伤害。

表 4-13　人体接受不同辐射剂量的后果及某些典型环境下的辐射剂量

辐射量① Sv，(希沃特，J/kg)	接受辐射后的后果，产生该辐射的典型环境
4.5～8.0	30d 后，将濒临死亡
2.0～4.5	脱发，血液发生严重病变，部分人在 2～6 周内死亡
0.6～1.0	出现各种辐射疾病
0.1	癌症发病率为 1/130
0.05	每年工作所接受的核辐射剂量
0.007	进行大脑扫描诊断时的辐射剂量
0.0006	人体内的辐射量
0.0001	乘飞机时受到的辐射量
0.00008	建筑材料每年所产生的辐射量
0.00001	腿部或手臂进行 X 光检查时的辐射剂量

①此处辐射量是剂量当量，表示单位质量（kg）人体组织在接受辐射后产生的能量（单位：焦耳，J）。

三、放射性废物的处置及相应的地球物理问题

根据国际原子能结构的估计，到 1995 年，全球的核废料总量已达 447000t（即在核反应堆中用过的燃料元件和靶，主要是铀和钚的同位素）。高放射性废弃物在处置前一定要储存一定时间，使核废料在继续发生核反应时产生的热降低到容易控制的水平。另外，在原子能反应堆用过的燃料元件后期处理时还会产生高放射性的废水，其中不乏毒性大、半衰期长的放射性同位素（如^{90}Sr，^{137}Cs）。对放射性废弃物处置的原则是要在长时间内使放射性废弃物（包括固体的放射性废弃物和放射性废液）和生物圈隔绝。保存和处置这些核废料的困难是核废料在储藏过程中，由于还继续发生核反应而发出大量的热，因而使储藏困难。例如，放射性废液由于核衰变生热会使放射性废液的温度上升甚至自沸，增加储藏的困难。因此目前认为有效的方法是将放射性废液和化学添加剂一起烧结为玻璃状固化体，然后再储藏。目前对高放射性废弃物的处置方案有：地质处置、太空处置、深海海床下处置、岩熔处置（将核废料置于地下深井中，利用废弃物的自热使废弃物与周围的岩石熔化成为一体）等在反应堆外储藏的方案。另外还有将核废料放置在反应堆中使之在中子流作用下将长半衰期的放射性同位素活化为短半衰期元素的处置方案。

在上述各种方案中，比较现实而且已经被发达国家采用的方案是地质处置方案。方案的

实施是将高放射性废弃物封存在专门建造的坑道或由现成的矿洞改建的洞穴中，或者封存在专门的深井中。对封存放射性废弃物的洞穴或深井的选址要进行详细的工程和水文地质调查。矿山式的洞穴应在300～1500m的深处，而深井则应在几千米的深处。无论是洞穴或深井封存，其周围的岩石应该是密封性好，没有裂缝、不渗透的层段。

近年的实验研究发现，储藏放射性废弃物的深井或洞穴附近的岩石，由于放射性废弃物自身的核衰变产生的热，会使岩石发生"热开裂"。实验研究表明，即使是花岗岩在受热升温到某个阈值时，会由于岩石的矿物成分不均匀而产生微裂缝，这些微裂缝在宏观上看是比较均匀的，并会使岩石由于微裂缝的产生而渗透性发生改变。这种渗透性的变化对将放射性废弃物与生物圈隔绝并不有利。

第三节　利用核磁共振方法检测水中的污染物

自1946年E.M.Purecell和F.Bloch同时发现物质中的核磁共振现象以来，到现在仅有几十年的历史。但随着科学技术的发展，核磁共振现象已由理论研究、试验进入到了应用与开发阶段，已经广泛应用于物理学、化学、生物学、医学等领域，在地学（主要是地球物理学）方面也得到了广泛的应用（质子磁力仪、NMR波谱仪、岩心测试仪及NMR测井工作等)。而利用核磁共振技术探查地下水则是该技术在地学应用中的新领域，成为目前唯一直接找水的地球物理方法。由于核磁共振测井技术NML与地面NMR找水技术具有共同的物理学和岩石物理学基础，一些研究成果可以互相引用。为此，根据核磁共振技术的原理，尝试将NMR与实验室NMR研究相结合，探索核磁共振技术在检测地下水中污染物方面的应用，进行过以下工作。

一、测量原理

大多数的原子核都围绕某一个轴自身旋转，如常见的氢核${}^{1}_{1}H$、碳核${}^{13}_{6}C$等。这种原子核自身旋转运动称为核的自旋运动，一般用"自旋矩"、"自旋动量矩"或"自旋角动量"来描述这种自旋运动。又因为原子核带一定的正电荷，电荷的旋转使得原子核产生一个磁场，并用磁矩来描述这种磁性质。

具有磁矩的原子核在恒定外磁场中，能量简并解除，分裂为一系列子能级。根据量子力学理论，如果作用到原子核系统上的电磁波的能量量子，等于原子核两相邻能级之间的差时，电磁波就会引起原子核在这两个能级之间的跃迁。从而引起原子核对电磁波的吸收或者辐射。这种共振跃迁，就是核磁共振现象。一般根据这种现象研究核磁共振。

具有磁矩的原子核由于本身的自旋，在静磁场中，受磁场对磁矩的作用力，原子核的运用类似于旋转的陀螺在地球重力场中的运动。这种运动称为进动（旋近）。用磁化强度M表征单位体积内的总磁矩。磁化强度矢量在磁场中的行为称为拉摩尔进动。进动的频率称为拉摩尔频率。研究具有弛豫特征的原子核磁化强度M在磁场中的运动规律便是各种核磁共振方法的基础。在处于恒定静磁场中的原子核系统，其磁化强度的纵向分量（与静磁场方向相同）和横向分量（与静磁场方向垂直）分别为$M_z=M_0$和$M_{\perp}=0$。当原子核系统受到外界作用（如在垂直静磁场的方向施加一交变磁场后)。核磁化强度就会偏离平衡位置。当外界作用停止以后，这种核系统的不平衡状态并不能维持，而是要自动向平衡状态恢复。这种恢复过程称为弛豫过程。M_z与$M_{\perp}$的恢复过程服从指数规律。描述核磁化强度的纵向分量M_z恢复过程的时间常数为T_1，称为纵向弛豫时间。因其是核自旋系统与周围环境（晶格）

交换能量的反映，故也称为自旋—晶格弛豫。横向弛豫时间 T_2 描述磁化强度横向分量 $M_\perp$ 的恢复过程，因该过程是由于核的自旋系统内部交换能量引起的，故也叫核的自旋—自旋弛豫时间。

在地球物理学方面应用最为广泛的核磁共振测井（NML），以及与之相关的实验室内NMR成像岩心分析仪器，都是通过测量饱和或吸附在介质孔隙中的流体的弛豫特征（弛豫时间），实现对介质内部结构和微观形态的描述，以及对宏观性能的评价。原则上得到与岩性无关的孔隙度、渗透率等参数。

地面核磁共振找水方法的原理是，地下水中的氢核（质子）具有微弱的磁性，显示出核子顺磁性在地磁场这一恒定磁场作用下产生一宏观磁化强度 M。如果在垂直于地磁场方向上施加一交变磁场脉冲，令交变脉冲磁场的频率等于质子在地磁场中的拉摩尔进动频率。并选择合适的脉冲宽度，使得宏观磁化强度 M 转向垂直于地磁场的方向，此时脉冲停止作用，M 将绕地磁场作进动，但由于弛豫作用，磁化强度横向分量按指数形式随时间衰减，衰减的特征时间为 T_2。磁化强度的纵向分量随时间而增长，趋于平衡值 M_0，增长的特征时间为 T_1。磁化强度的这种行为称为自由进动衰减。如果放置一接收线圈，线圈轴线方向与磁化强度横向分量方向一致，则可在线圈中接收到随时间周期变化的电动势。电动势的幅度随时间按指数形式衰减，称为自由感应衰减信号（FID）。改变脉冲参数并记录FID信号，由其振幅和横向弛豫时间，经过反演可得到地下水不同深度处各含水层的含水量、孔隙度和渗透率等数据。不同地层因弛豫时间不同，得到的自由感应衰减信号FID也不同。因此若含水层岩心中的水被污染物污染后，测量其弛豫时间的改变将是识别水体污染的一种可能方法。

实验室孔隙介质核磁共振技术是国际上应用核磁共振最活跃的领域之一。NMR岩心分析是一种有效的岩心分析方法，利用NMR，可直接观测到对应孔隙流体含量的信号幅度和反映流体自身性质及其所处孔隙环境的弛豫曲线与扩散行为。核磁共振定量分析的基础是信号幅度与被测样品中所含核自旋数目成正比，把样品测量结果同标样信号强度作比值，得到用百分比表示的定量数据。观测到的弛豫时间结果是多种弛豫分量共同贡献的结果，用多指数函数表示，对测量结果进行反演拟和，以图形的方式给出弛豫时间的分布结果。以弛豫时间分布中最大幅度所对应的时间为该样品的弛豫时间。

二、实验装置及样品制备

实验所用MARAN－2型岩心核磁共振分析系统是英国磁共振仪有限公司的产品。属低场永磁型，共振频率为2MHz。系统采用永磁体产生均匀磁场，外加电场产生一维梯度磁场，通过发射射频脉冲，使样品中的氢核共振；分析测试射频脉冲断开瞬间共振信号的弛豫特性和自旋回波信号，便可确定 T_1、T_2 和扩散系数等。

对黄淮海平原三大类地下水储存的蓄水构造—山前冲洪积扇、古河道型、隐伏岩溶的地质情况进行水文地质分析时发现，自山前平原到滨海平原，水文地质条件随成因类型的改变而发生明显变化，即沉积物颗粒由粗逐渐变细，含水层遵循由砾卵石—粗砂—中砂—细砂—粉砂递变模式，富水性由强变弱，地下水矿化度由低增高，水质由好变坏。因此在选择核磁共振岩心分析系统使用的岩心时，尽量选择粒度、孔隙度和渗透率较大的样品。本实验所选3块砂岩样品的基本参数见表4－14，其孔隙度及渗透率参数基本满足实验要求。

我国GBZB1—1999《地表水环境质量标准》中规定对地表水环境监测项目的采样点及监测频率应符合国家环境监测技术规范的要求，同时规定了标准项目的分析方法。标准将全

国水域分为5类使用功能Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ。世界各国地表水水质标准主要用溶解氧、生化需氧量、非离子氨等指标反映地表水环境质量。在我国保留化学需氧量和高锰酸盐指数这两项有机污染物综合指标。其他基本监测项目包括水温、pH值、氨氮、硝酸盐、硫化物、重金属等31项。无机盐污染物的检测基本都是化学方法。考虑本实验方法与传统水文检测方法的可比性，本实验选择了硝酸盐、氨氮和高锰酸盐作为水中的污染物质。这三种污染物在5类水域中的标准值见表4-15。

表4-14 实验所用3块岩心样品的基本参数表

岩心编号	岩心长度，cm	岩心直径，cm	孔隙度，%	渗透率，$\times10^{-3}\mu m^2$
55	2.535	2.423	26.08	835
28	2.313	2.499	21.8	519
10	2.453	2.520	16.69	110

表4-15 5类水域中硝酸盐、高锰酸盐指数和氨氮的标准值 单位：mg/L

污染物种类	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
硝酸盐	≤10以下	≤10	≤20	≤20	≤25
高锰酸盐指数	≤2	≤4	≤8	≤10	≤15
氨氮	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤1.0	≤1.5

从表4-15的数据可以看出，环境监测技术方法检测水体中的污染物的浓度可以到0.5ppm以下，而目前在实验室NMR岩心分析中发现，NMR对矿化度敏感的最低值是10000ppm，即1l水中要求有10g溶质。根据水域中污染物标准值以及NMR实验可检测出的矿化度最低限，将实验中所用的硝酸钾（KNO_3）、高锰酸钾（$KMnO_4$）和磷酸二氢氨（（NH_4）H_2PO_4）的浓度分别设置为标准值的100倍以上（对磷酸二氢氨增加了标准值50倍），本实验中三种污染物的浓度设置见表4-16。

表4-16 本实验中KNO_3、$KMnO_4$、（NH_4）H_2PO_4的浓度设置值 单位：mg/L

KNO_3	100		1000	10000	20000
$KMnO_4$	200		1000	10000	15000
（NH_4）H_2PO_4	50	500	500	1000	1500

此外，本实验还根据一般洗衣粉的标识用量，选用浓度为3000ppm进行NMR实验测量。

本实验将先对四种污染物在不同浓度下的水样进行测量，同时与纯水中的弛豫结果进行比较。选出测量结果差异明显的浓度，进行岩心饱和，然后测量污染物在岩心中模拟含水层时弛豫时间的差异。这样实验大致共需测量34次。测量68个弛豫时间数据。

进行污染物饱和岩心测量时，同一溶质不同浓度时，先测量饱和低浓度时的弛豫时间，再将岩心饱和在高浓度中进行洗盐、抽真空。溶液中的溶质改变时，岩心应先在纯水中洗盐，随后在烘箱中干燥，进而饱和溶液抽真空。

三、实验结果及分析

1. 溶液实验结果

以水中不同溶质分类，比较同一物质在水中溶解不同浓度时的 T_1 及 T_2 测量结果。三种溶质的结果见表 4－17（a）、4－17（b）、4－17（c）。

表 4－17（a） KNO_3 在四种浓度下的溶液 T_1、T_2 测量结果

浓度，ppm	T_1，ms	T_2，ms
100	2396	2309
1000	2442	2049
10000	2334	2303
20000	2208	2577

表 4－17（b） $KMnO_4$ 在四种浓度下的溶液 T_1、T_2 测量结果

浓度，ppm	T_1，ms	T_2，ms
200	2432	2213
1000	2128	2218
10000	2143	2217
15000	2140	2574

表 4－17（c） $(NH_4)H_2PO_4$ 在 5 种浓度下的溶液 T_1、T_2 测量结果

浓度，ppm	T_1，ms	T_2，ms
50	2437	2282
100	2398	2484
1000	2481	2538
1500	2473	2528
5000	2276	2074

蒸馏水在温度为 20℃ 时的 T_1 和 T_2 以及 3000ppm 的洗衣粉溶液的 T_1 和 T_2 值见表 4－18。

表 4－18 蒸馏水在 20℃ 时的 T_1、T_2 以及 3000ppm 的洗衣粉溶液的 T_1 和 T_2 值

溶 液	T_1，ms	T_2，ms
蒸馏水（20℃）	2271	2185
洗衣粉溶液（3000ppm）	2725	2487

对以上三种溶液的弛豫时间与浓度的关系进行分析，结果见图 4－4 的（a）、（b）、（c）。

对以上图表数据进行分析，从表 4－17 及表 4－18 中弛豫时间的数值可以看出，各种不同溶质不同浓度时溶液弛豫时间不仅与纯水的弛豫时间存在差异，各浓度下的弛豫时间值也不尽相同。差异的大小又因溶质和浓度不同而不同。

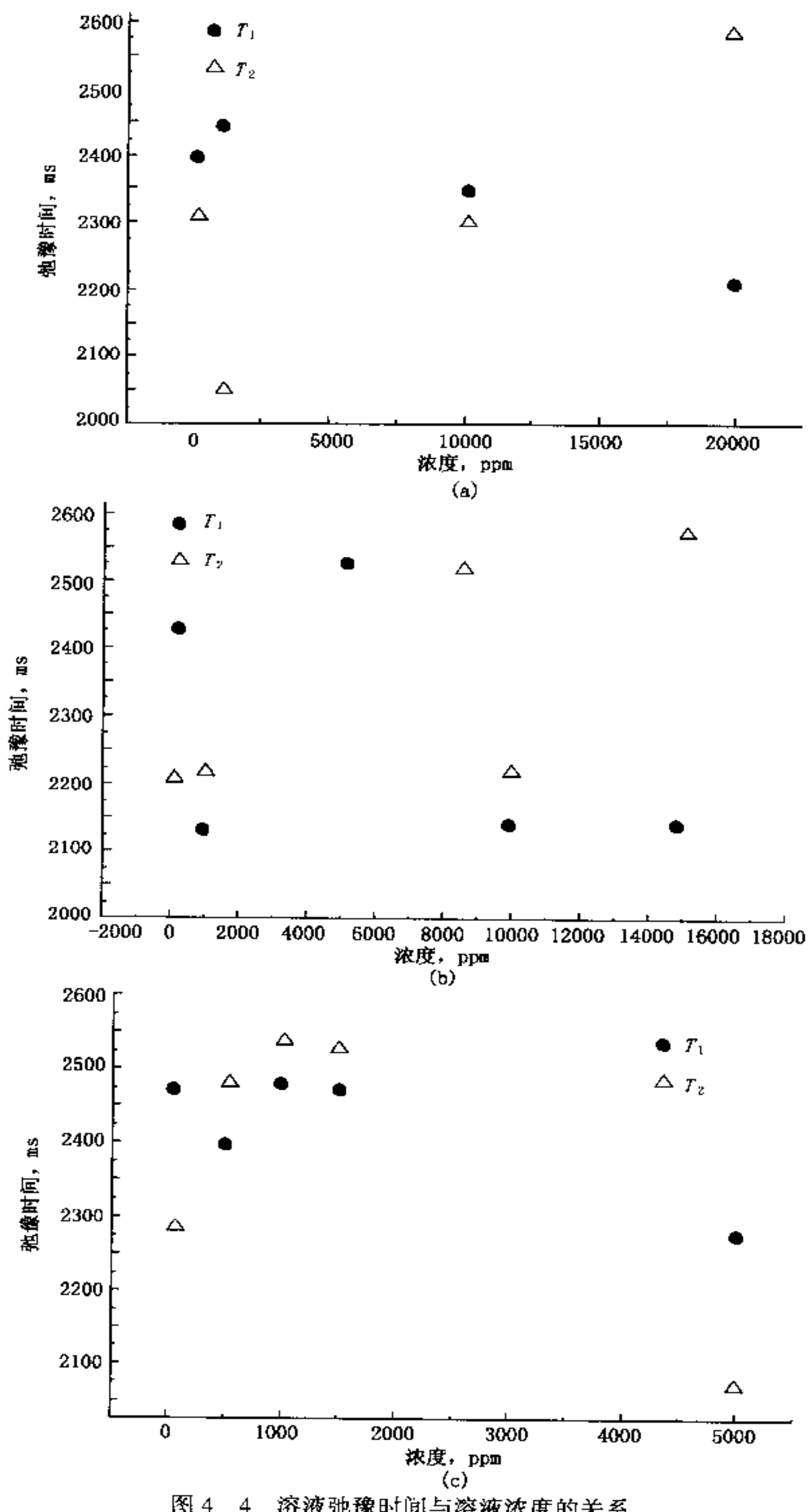


图 4 4 溶液弛豫时间与溶液浓度的关系

(a) KNO_3 溶液；(b) $KMnO_4$ 溶液；(c) $(NH_4)H_2PO_4$

$(NH_4)H_2PO_4$ 溶液的各浓度下的弛豫时间均大于纯水的弛豫时间（5000ppm 时的 T_2 除外）。T_1 的最大相差 210ms（1000ppm 时），T_2 的最大相差达到 353ms（1000ppm 时）。

KNO_3 四种浓度溶液的弛豫时间也大部分大于纯水的弛豫时间。但整体上弛豫时间值比 $(NH_4)H_2PO_4$ 的弛豫时间值要小。

$KMnO_4$ 四种浓度溶液的弛豫时间出现了 T_1 大部分小于纯水 T_1 值，而 T_2 值大部分略高于纯水 T_2 值。

洗衣粉的成分主要是十二烷基苯磺酸钠、磷酸盐等，按通常用量配制的洗衣粉溶液的弛豫时间值远大于纯水的数值，T_1 的差异达到 454ms。

以上三种溶质各自不同浓度溶液中都未表现出随着浓度的增加，弛豫时间出现单调的变化关系。由于浓度设置的数值较少，且各浓度值间隔较大，对弛豫时间与浓度的关系应另做详细研究。

2. 岩心实验结果

由于本实验以探讨为目的，故在进行岩心饱和溶液测量实验前，先根据纯溶液时的测量结果进行浓度的选择，以使测量结果尽可能差异明显。根据纯溶液的测量结果，选择同一溶质时测量值差异较大的两种浓度即可。且由于高锰酸钾溶液高浓度时的颜色过深，岩心饱和该溶液后无法清洗。对高锰酸钾只选用了最小浓度。

岩心饱和溶液时，先干燥 48h，称干重，抽真空饱和后称湿重。所有测量岩心均达到 90% 以上的饱和。三块岩心的测量结果见表 4－19（a）、4－19（b）、4－19（c）。

表 4－19（a） 55 号岩心在饱和各种液体后弛豫时间测量结果 单位：ms

饱和溶液	KNO_3		$(NH_4)H_2PO_4$		$KMnO_4$	纯水	洗衣粉
	1000 ppm	20000 ppm	500 ppm	1500 ppm	1000 ppm		3000 ppm
T_1	141	162.3	153.2	96.7	154.7	146.5	151.9
T_2	144.3	153.1	150.0	90.1	147.8	157.4	147.6

表 4－19（b） 28 号岩心在饱和各种液体后弛豫时间测量结果 单位：ms

饱和溶液	KNO_3		$(NH_4)H_2PO_4$		$KMnO_4$	纯水	洗衣粉
	1000 ppm	20000 ppm	500 ppm	1500 ppm	1000 ppm		3000 ppm
T_1	207.8	215.2	208.3	131.5	209.1	202.8	167.3
T_2	212.8	215.7	209.7	131.1	220.9	244.1	181.1

表 4－19（c） 10 号岩心在饱和各种液体后弛豫时间测量结果 单位：ms

饱和溶液	KNO_3		$(NH_4)H_2PO_4$		$KMnO_4$	纯水	洗衣粉
	1000 ppm	20000 ppm	500 ppm	1500 ppm	1000 ppm		3000 ppm
T_1	184.8	193.4	190.2	107.1	197.4	212.9	194.4
T_2	142.6	150.6	142.9	75.8	147.4	158.7	147.6

对以上三块岩心中的实验结果进行分析，三块岩心的孔隙度不同，渗透率不同。饱和同一种溶液后，因孔隙流体的含量不同，流体中的氢含量也不同，故测量出的 T_1、T_2 值也不同。测量这种弛豫时间差异将可反映孔隙度和渗透率的不同。但本实验是在岩心孔渗参数已知的情况下，得到饱和不同溶液后的弛豫时间差异。故不讨论不同岩心间结果的差异，而着重于同一岩心不同饱和液体的结果分析。结果分析如下：

由于在孔隙介质中，存在孔隙界面弛豫，使弛豫作用增强，即弛豫时间常数减小，故岩心中的测量值远低于溶液的测量值。

对同一溶质而言，三块岩心中，KNO_3 表现出高浓度时的弛豫时间值高于低浓度时的值。而（NH_4）H_2PO_4 则为高浓度时的弛豫时间值低于低浓度时的值。但因浓度样品数有限，无法得出浓度与弛豫时间的单调增长或减小关系。

各岩心在饱和水时测得的弛豫时间与饱和其他物质后弛豫时间存在差异。但各差异大小不一，将受分析识别精度的影响。

饱和水以外的各不同物质时，并未出现不同物质的弛豫时间明显差异，以 55 号岩心为例，500ppm 时的（NH_4）H_2PO_4 与 1000ppm 时的 $KMnO_4$ 的弛豫时间非常接近。这表明分析出岩心饱和溶液的化学成分将存在困难。

四、结论

作为传统的地球物理方法在环境领域中应用的一个出发点，首先选择了水体污染物为研究对象，进行污染物的监测及预测工作。核磁共振方法在理论上应可以识别出不同物质。但因记录和使用的是弛豫时间值，影响因素较多。本实验在选择污染物浓度远高于地表水环境标准的条件下，仍未得出溶液浓度与弛豫时间之间存在单调的增减关系，在岩心中的实验也未表现出水体有不同污染物质时，弛豫时间会出现明显的差别。但并不能因此否定核磁共振方法的可行性。本实验所用岩心核磁共振分析系统为低场型，对流体的成分并不关心。而是将流体作为一种介质来反映孔隙内部的结构。高场（100MHz）核磁共振系统则适合做样品成分分析，可消除孔隙界面的弛豫影响等。因此，作为一种新方法的尝试，应继续进行这方面相关的工作，使用高场系统，所选择样品数目增加，消除偶然影响因素。传统地球物理方法移植到新领域中，仍需要做相当的调整，特别是精度上的提高。这都是以后工作的重点。

第四节　核辐射探测方法在环境监测中的应用

辐射背景值是评价自然环境的重要指标，而且放射性污染是环境污染的重要内容。对自然环境的天然辐射背景值的测定和对放射性污染的检测，都需要用核辐射探测方法进行。在环境地球物理学问题中，核辐射探测要回答的问题是两方面：第一，天然核辐射的污染区和污染源在哪里？辐射强度有多大？对人类健康是否构成威胁？第二，人类活动引起的核辐射场的变化的评估、追踪和预测。其中包括对核爆炸、核事故（如对切尔诺贝利核电站事故影响区域、危害程度的评估）和对丢失的放射性源的追踪和寻找。核地球物理方法（核物探）在解决这类问题时，虽然没有环境监测部门在测点上高精度的观测结果。但其优点是可以连续、快速地进行观测。

一、全国或区域性自然放射性背景值调查

原苏联早在 1982 年就开始对国土区域内放射性异常进行系统调查。最早是在莫斯科区域进行放射性污染调查（1982），后来在列宁格勒（现名圣彼得堡）、基辅、托姆斯克和其他

大工业城市区域进行调查。1989 年原苏联政府将全国放射性生态环境调查列入国家计划。20 世纪 90 年代初，已有由 10 余架航测飞机、16 辆车载 γ 能谱测量仪、几十个地面 γ 详查分队组成的在航空、车载、地面步行三个层次上工作的完整的观测系统。航空放射性测量的 γ 能谱仪的探测器体积为 30～50L，航测比例尺为 1:1000，飞行高度 50～75m，可测定自然 γ 总计数率，铀、钍、钾（^{40}K）、^{137}Cs、^{134}Cs 的分布异常。车载 γ 能谱测量仪的探测器体积为 6～12L，可记录 γ 射线总计数率，测定铀、钍、钾（^{40}K）的含量。地面步行 γ 观测系统则可以 1:2000 至 1:100 的比例尺进行记录。

1991 年原苏联在 9400km² 区域内完成了比例尺为 1:10000 的航空 γ 能谱测量；车载 γ 能谱测量的工作量为 33600km，在面积为 754km² 区域内完成比例尺为 1:2000 以上 γ 辐射背景值普查。1992 年以前，原苏联已对 210 个城市完成了放射性生态环境调查；1992～1995 年计划再对约 200 个城市、工业区和公众休养区进行放射性生态环境调查。这样，人口在 1 万人以上的城镇将全部完成放射性生态环境调查。在被调查的城市中，查明 3000 多个放射性污染区域。例如在叶卡杰林堡一幢 5 层楼房的钢筋混凝土梁中发现辐射剂量率为 300R/h 辐射源（R：伦琴，辐射量单位，1R＝1 伦琴，是 1cm³ 空气在标准状态下，由于受到辐射而发生电离，若电离产生的电荷是 1 静电系单位电量，则这 1cm³ 空气受到的照射量为 1R；R/h 为照射量率单位，h 为小时，1R/h 为在 1h 内，1cm³ 空气在受到辐射时，由于空气电离产生的电荷为 1 静电系单位电量）。在赤塔州的克拉斯诺卡米斯克的一所住宅的阳台上找到一个辐射剂量率为 56R/h 的放射性源。在莫斯科森林公园发现 4 个铯（^{137}Cs）污染区域，在其中一个区域的密室内找到两个辐射量率超过 300R/h 的装在安瓿内的铯源。

我国从 1955 年开始进行航空放射性测量，20 世纪 90 年代航空放射性测量覆盖地区已包括华东、华南、辽东等人口密集工业发达的地区，面积达 326.1366 万 km²，占全国陆地面积的 34%。

1988～1994 年核工业航测遥感中心先后在河北石家庄、云南的红河州（个旧市为红河州首府）、秦山核电厂周围（含上海）进行以放射性生态环境调查为目标航空放射性测量。曾在石家庄北郊电厂附近发现面积为 1.5km²，铀丰度大于 8g/t（最大值为 11.8g/t）、钍丰度 27g/t（最大值 34.5g/t）的异常区域，该区域内铀和钍的丰度都高于正常背景值的 3～5 倍。经地面调查发现，污染源是电厂的煤灰池和散落在附近的煤灰造成。

航空 γ 能谱测量还在上海市奉贤县附近发现放射性异常点。经地面调查，污染源是奉贤县育村化肥厂的原料引起：该厂从摩洛哥进口用作磷肥的磷矿粉堆成面积为 40m×40m 高 4～5m的两堆。矿粉上铀的丰度达 101.96g/t（最高达 121.77g/t），是背景值（2.25g/t）的近 45 倍。

二、核事故的污染监测

20 世纪 50 年代以后，在核武器发展、竞赛的同时，核电站和核技术发展也很迅速。1992 年，全世界有核电站 419 座，装机容量 3.43 亿 kW，占世界总发电量的 17%。另外还有 85 座新的核电站在修建中。随核电站和核反应堆的数量增加，核事故也时有发生，从 20 世纪 50 年代以来，发生过的重要核污染事故有：

1957 年 1 月 8～10 日，英国温斯克尔一座军用的、生产钚的反应堆着火，由于放射性污染，该区居民癌症患者明显增加；

1957 年 12 月 14 日，法国马库尔一座石墨气体反应堆的一条管道破裂放射性物质溢出，使工作人员和当地居民受到伤害；

1961年1月3日，美国爱达荷国家反应堆试验中心发生爆炸事故，3人死亡，多人受伤；

1979年3月28日，美国宾夕法尼亚州萨斯奎汉纳河中的三里岛上的核电站发生了美国历史上最严重的核事故：2号反应堆的供反应堆芯冷却用水的阀门被错误关断，反应堆芯52%熔毁，并使反应堆包层中的锆与周围的过热水蒸气发生反应生成大量氢气，并有部分氢气和放射性物质泄漏，虽然泄漏的放射性物质并未对居民的健康构成威胁，但未受伤害的1号反应堆直到1985年才恢复运转，而2号反应堆一直未能恢复使用。

1. 切尔诺贝利核事故监测

1986年4月26日，发生在切尔诺贝利（Chelnobyl）核电站事故是人类历史上最严重的核污染事故。切尔诺贝利核电站在乌克兰首都基辅以北104km的切尔诺贝利城西北16km处，核电站有4座反应堆，每座发电能力10^6kW，1977年到1983年陆续并网发电，1986年4月26日由于操作失误（从4号反应堆中抽出几乎所有的控制杆），在子夜1时23分4号反应堆芯发生链式反应，爆炸和大火将反应堆厚重的钢筋混凝土盖炸毁，造成约0.5～1.85亿Ci的放射性物质泄漏，其放射性活度约是在广岛投下的原子弹的500倍。4月27日附近居民开始撤离；4月28日瑞典监测站发现大气中放射性物质含量极高，此后，向当时的苏联政府提出质问，苏联政府才承认发生了核电站爆炸事故，并开始清理放射性残余物，即将含放射性物质的碎片分散在约800个场所，并用钢筋混凝土的“石棺”将其封闭。1991年2号反应堆失火后关闭，1号、3号反应堆后来也在欧洲邻国的强烈要求下关闭。这次事故后果极为严重：4月26日当场死亡32人，事故发生14年后，因这次事故死亡的人数达1.5万人（其中自杀者占38%），另有5万人因受放射性射线照射而终身残疾（二级残废），乌克兰全境的5000万人中336万人（其中儿童126万人）受到放射性射线的伤害，参加事故抢救的35万人中，14年后健康者所占比例不到10%。在当地人群中甲状腺癌的发病率比事故前高10倍。放射性污染物不仅散布到俄罗斯、白俄罗斯，还到达远处的法国和意大利，使数百万公顷的农田、森林受到污染。切尔诺贝利核电站事故的教训是核电站的设计不合理、操作不安全、管理人员的专业素养差和官僚主义，与之形成反差的是数以万计的苏联青年志愿者不畏牺牲，奋勇抢救的精神和事迹。

早在核电站建成之前，原苏联的乌克兰科学院从20世纪60年代初期就通过在基辅的监测站对基辅周围地区（包括切尔诺贝利地区）进行长期放射性环境监测。监测的参数包括γ辐射背景值：用辐射仪测量；散落物的放射性活度测量：用面积为40cm×40cm的平底盘采集，盘底铺一张浸泡过甘油的滤纸，采集持续两周，采集的样品放在瓷坩埚内在电热炉（马弗炉）中加温到500℃灰化，然后测定其β辐射强度；土壤放射性污染检测：在地表下5cm深处用正方形取样器（10cm×10cm）取样，样品风干、磨碎、过筛后，测定其β辐射强度。

事故前，γ辐射剂量率为10～12μR/h（背景值），1986年4月26日1时发生事故后，4月30日升高到5mR/h，比背景值高约500倍。在随后几天内γ辐射值变化强烈，与放射性物质的继续泄漏和天气变化有关。5月9日在反应堆再次爆炸后，γ辐射也再次出现高峰。1986年底，γ辐射降低到50μR/h，1992年（监测结果公布前）再次降低为16～18μR/h，接近事故前的背景值。

放射性散落物在1963～1986年事故发生前呈下降趋势。在事故发生后放射性散落物的辐射强度比事故前高一个数量级（由于在对采集的样品灰化时，放射性碘（^{131}I，^{132}I被蒸发，这个测量结果比实际结果偏低）。1987年该值明显下降，1992年恢复到背景值。

土壤中的β放射性活度（按土壤质量计）在事故前为 550～740Bq/kg，事故后升高到 29600Bq/kg。事故前放射性锶（^{90}Sr）的质量活度为 3.7～22.2Bq/kg，事故后升高了 10 倍。

切尔诺贝利核电站核泄漏形成的放射性散落物还被邻国的监测网监测到。瑞典斯德哥尔摩的地面空气取样装置首先发现大气中非天然的放射性元素含量剧增。图 4－5 是斯德哥尔摩取样站于 1986 年 4 月 29 日（事故发生后第三天）采集到的空气样品的 γ 能谱。

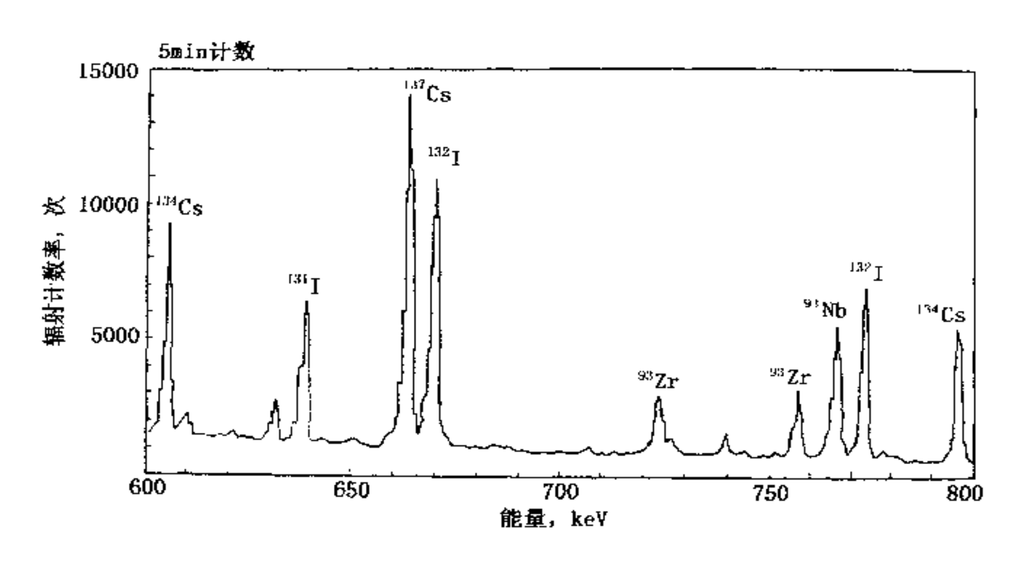


图 4－5　斯德哥尔摩取样站 1986 年 4 月 29 日所取空气样品的 γ 能谱

空气样品中的放射性元素用玻璃纤维过滤器采集，纵坐标是 5min 的计数率

从图 4－5 可见，^{131}I（碘，$T_{1/2}=8d$）、^{132}I（碘，$T_{1/2}=2.4h$）、^{134}Cs（铯，$T_{1/2}=3h$）衰变时辐射出的特征 γ 谱线明显。由于^{134}Cs 极少见于核武器试验的散落物，因此污染物来自核试验的可能性极小。又根据瑞典气象研究所提供的气流轨迹资料，证实大气中放射性污染物来自苏联的立陶宛、拉托维亚、白俄罗斯、乌克兰。4 月 28 日瑞典空军飞机沿瑞典东部边界波罗的海上空 300m 处采集的气样中发现了放射性污染物含量的极大值区，此后在不同高度的大气层中采样，查明在 4km 以上高度的空气中放射性污染物不再增加，因此排除了污染物来自重返大气层的核动力卫星毁坏的可能性。

1986 年 5 月 1～6 日，瑞典地质调查所动用了两架物探专用飞机在 150m 低空进行航空 γ 能谱测量，调查污染区的范围。后来调查区重点移向瑞典南部，目的是查明当地春天新生的牧草是否适于奶牛食用。5 月 9 日～6 月 9 日，在整个瑞典用航空测量调查污染区的范围和变化（测线距 50km，异常区加密到 2km）。

苏联在 1986 年 4 月 28 日以后，在国内面积为 527400km^2 的区域内进行过比例尺为 1:10 万、1:20 万、1:50 万的航空 γ 能谱测量，以监测放射性污染弥散的区域。

2. 追踪核动力卫星宇宙—954（KCMOC—954）陨落后碎片

原苏联的用核反应堆作动力的宇宙—954 卫星 1977 年底～1978 年初在加拿大西北部陨落。1978 年初加拿大国防部和美国能源部（DOE）合作，追踪卫星陨落的碎片在加拿大的散落位置。首先根据预测的卫星陨落轨道，划出一条长 800km 宽 50km 陨落区域，并将其分为 14 段。用 4 架 C—130Heracles（大力神）飞机在 500m 高度上以 1.852km（1n mile）的测线距进行航空 γ 能谱测量。1 月 31 日，完成了对预测陨落区域的普查，将卫星的放射性散

落物分布的区域圈定为大奴湖以东一个宽10km的区域内。在此区域内，在250m的高度上，以500m的测线距，用直升机进行详查（C—130飞机不能进行高度为250m的超低空飞行），在预测的区域内找到了放射性碎片，此后的测量证明核动力反应堆芯在重返大气层后全部解体，部分碎片被北风吹到大奴湖南部。同年夏天，加拿大原子能监控管理局（AECB）做了进一步的监测和清理，共清除了3500多块卫星碎片。

三、建筑材料放射性污染的检测和评价

除了房屋地基的岩石、土壤会逸出氡外，建筑材料中也可能含有某些放射性元素，因此也可能成为放射性污染源。当建筑材料中镭的质量活度高于37Bq/kg时，会成为室内空气中氡的重要来源。有些地方用工业废料作为制造建筑材料的原料，可能将工业废料中的放射性污染物带入室内。如我国用白云鄂博尾矿、矿渣作原料制造水泥的工厂，用其生产的水泥建造的房屋时室内氡的浓度比对照组高4～6倍。对美国常用建筑材料放射性调查的结果表明，木材辐射出的氡最少，混凝土最多。

我国居民住宅多用砖作建筑材料，其中放射性^{40}K（钾）质量活度最高为148Bq/kg，镭（Ra）其次为37～185Bq/kg，钍（Th）为37～185Bq/kg。对于天然建筑材料，建材行业标准（JC518—93）将其分为三类，见表4－20。

表4－20　我国天然建筑材料核辐射分级标准

级　别	辐射当量浓度，Bq/kg	应用范围
A	＞350	可用于任何建筑
B	351～700	可用于居室内饰面以外的任何建筑
C	701～1000	可用于建筑物的外饰面

为了评价建筑材料的核辐射强度，俄罗斯勘探地球物理研究所提出根据建筑材料中有效放射性质量活度$A_{эф}$（Bq/kg），即1kg（单位质量）建筑材料中，在单位时间（1秒钟）发生的放射性衰变次数（Bq），将其分为3级，见表4－21。

表4－21　俄罗斯勘探地球物理研究所规定的建筑材料分级标准

级　别	Ⅰ级，上限值	Ⅱ级，上限值	Ⅲ级，上限值
材料有效放射性质量活度$A_{эф}$，Bq/kg	370	740	1350
材料允许使用范围	新建房屋	居民点内铺路	居民点外铺路

建筑材料有效放射性质量活度$A_{эф}$的计算方法是：

$$A_{эф} = A(U) + 1.31A(Th) + 0.085A(K) \qquad (4-1)$$

式中　A（U）、A（Th）、A（K）——建筑材料中铀（U）、钍（Th）、钾（K）质量活度。

建筑材料中铀、钍、钾的质量活度A（U）、A（Th）、T（K），取决于建筑材料中铀、钍、钾的丰度W（U）、W（Th）、W（K）以及铀、钍、钾本身的质量活度a（U）、a（Th）、a（K），即

$$A(U) = W(U) \times a(U) \qquad a(U) = 12.35Bq/kg \qquad (4-2a)$$

$$A(Th) = W(Th) \times a(Th) \qquad a(Th) = 4.06Bq/kg \qquad (4-2b)$$

$$A(K) = W(K) \times a(K) \qquad a(K) = 313Bq/kg \qquad (4-2c)$$

各种类型岩石中放射性元素的丰度 W（U）、W（Th）、W（K）由表 4－11 给出。

例如，要计算岩浆岩的有效放射性质量活度 $A_{эф}$，其步骤如下：

从表 4－11（第一行）上查出岩浆岩中铀、钍、钾的丰度：W（U）＝2.5，W（Th）＝13，W（K）＝2.5，由式（4－2a）、式（4－2b）、式（4－2c）计算岩浆岩中的铀、钍、钾的质量活度：

A（U）＝W（U）×a（U）＝2.5×12.35＝31（Bq/kg），

A（Th）＝W（Th）×a（Th）＝13×4.06＝53（Bq/lg），

A（K）＝W（K）×a（K）＝2.5×313＝783（Bq/kg）。

再由式（4－1）计算岩浆岩的有效放射性质量活度：

$A_{эф}$＝A（U）＋1.31A（Th）＋0.035A（K）＝31＋1.31×53＋0.085×783＝167（Bq/kg）。

表 4－22 为岩石中铀（U）、钍（Th）、钾（K）的平均丰度及有效放射性质量活度。

表 4－22　岩石中铀（U）、钍（Th）、钾（K）的平均丰度及有效放射性质量活度

岩石种类 岩石名称	铀的丰度， W（U），g/t	钍的丰度， W（Th），g/t	钾的丰度， W（K），g/t	有效放射性质量活度，Bq/kg
岩浆岩	2.5	13	2.5	167
超基性岩（橄榄岩等）	0.03	0.08	0.13	4.8
基性岩（辉长岩、玄武岩）	0.6	1.8	0.7	35
中性岩（安山岩、闪长岩）	1.8	6.0	1.8	100
酸性岩（花岗岩、流纹岩）	2.1～7.0	8.3～19	2.3～4.0	131～294
碱性岩（正长岩、粗面岩）	4.0～10.0	20～50	4.0～5.0	262～522
沉积岩				
岩　盐	1.0	1.0	8.0	230
碳酸盐岩	1.8	2.0	0.3	41
硅质岩	1.7	2.2	0.3	41
碎屑岩（砂岩、泥岩、砾石、粘土）	3.1	10.4	1.8	140
煤	1.8～13.7	0.5～6.0	0.3～1.0	35～220
碳质页岩	12～100	7～11	1.7～2.8	230～1370
变质岩				
铁镁质硅酸盐类（闪岩、石英岩等）	0.6～1.3	1.8～4.2	0.2～1.7	22～84
长石石英质岩石（变质砂岩、结晶片岩、片麻岩）	2.6～3.5	9.0～16.0	2.5～3.6	146～225

要说明的是，表 4－22 中各类岩石的有效放射性质量活度是根据地壳岩石中铀、钍、钾的平均含量（克拉克值）算出，而实际用作建筑材料的岩石，其铀、钍、钾的丰度变化范围很大，如花岗岩中铀的丰度与其形成年代、矿物成分比例、风化程度、裂缝发育程度有关。产地不同的花岗岩其实测铀的丰度与地壳中花岗岩铀的平均丰度（克拉克值）可相差几十倍。

四、矿产资源开发过程中的放射性监测

除了铀矿等放射性矿床以外，某些金属矿和磷酸盐矿，甚至建筑材料（如花岗岩）都有放射性，另外煤矿开采和油田开发也会放射性污染。这些都可以通过对核辐射的监测进行监

控和预警。

美国犹他州盐湖城的维特罗选矿厂从1951年到1964年，共选铀矿石170万t，直到1968年还继续选取钒矿石。在选矿厂附近形成面积4.7万m^2、平均厚度约4m的尾矿堆。据估算，尾矿堆所含镭（^{226}Ra）总量5121×10^{10}Bq，平均质量放射性活度为17000Bq/kg，平均氡发射率20.35Bq/（$m^2\cdot s$），从而形成一个9.62×10^6Bq/s的稳态氡源。1979～1980年美国能源部在盐湖城地区进行航空放射性测量，观测系统安装在BO—105直升机上，探测器是20个体积为645.7cm^3的NaI（Ti）晶体。航测时飞行高度46m，测线距76m。以在非矿区、非选矿厂的水面上飞行时测量结果为背景值。背景值区放射性辐射的剂量率变化范围为6.0～8.9μR/h，由尾矿以前的异常区的辐射剂量率在1389μR/h以上，比背景值高约200倍，因此很容易从航测异常图上圈定尾矿污染的区域。除尾矿堆外还在附近发现两个辐射剂量率高的区域。其一在尾矿堆西面，是风吹走尾矿的矿粉所致；其二在尾矿堆东面沿铁路线分布，是由铁路运输矿粉产生的。根据航测结果查明的放射性污染物来源有选矿厂的尾矿、铀矿石堆、放射性炉渣和封存的选矿设备。20世纪80年代初，这些污染物都得到清理。

德国的曼斯菲尔德附近是从公元1199年就开始开采的铜矿区，几百年的开采产生了范围相当大的矿渣堆。1986年原民主德国地球物理调查所在该区进行过航空γ测量，飞行高度100m，测线距离250m。根据航空测量结果编制了1:25000的铀、钍、钾分布图。测量结果表明矿渣堆铀的丰度可高达79g/t。

煤是世界上的主要能源之一。煤的燃烧过程伴随着放射性元素在燃烧产物中的富集过程。因此煤燃烧后产生的粉煤灰是量大面广的放射性污染源。据联合国原子辐射效应科学委员会（UNSCEAR）统计，一座每天烧煤10t的热电厂，向大气排放的^{238}U的放射性活度为1850kBq；一座100万kW的热电厂每年排放粉煤灰50万t，其中14万t（占28%）排放进入大气。据印度Aligarh Muslum大学对两座热电厂的研究，发现热电厂所用煤中铀的丰度为17.1g/t（略高于世界平均值），炉渣中铀的丰度是25.7g/t，粉煤灰中铀的丰度达29.1g/t。有报道认为，在热电厂附近由于粉煤灰的放射性引起的癌症发病率要高于周围地区。

用煤渣和粉煤灰制造建筑材料（砖）曾经被认为是煤矿资源综合利用的途径。但若煤或煤燃烧的产物放射性偏高时，将有不良后果。中国核工业总公司曾对用石煤渣砖建造的房屋内的γ辐射的吸收剂量率进行过调查，其结果见表4－23。

从表4－23可见，用石煤渣砖建造的房屋，其γ辐射剂量率比对照组房屋高约3～9倍。另外对福建西部某些用工业固体废弃物制造建筑材料的工厂产品的放射性监测发现，石煤渣制品中铀、钍的丰度比对照组高3～5倍。

石油勘探开发中发生的放射性污染是20世纪80年代后期才发现和注意的问题。1988年原苏联在全国放射性生态环境调查中发现巴库和高加索油气区石油管道的辐射剂量率达到200～2000μR/h。后来在斯塔夫罗波尔边疆区的放射性测井和地面放射性测量发现，在石油开采过程中，当油和地层内流体从地层流向井时，由于温度和压力降低，原来溶解在地层水中的放射性矿物会沉淀在套管外的水泥环上、射孔孔眼附近，有一部分还会沉淀在输油管道、油水分离装置、贮油罐的管壁或器壁上。采油厂的废水和采油井、注水井井口和管道的泄漏，每年定期更换的油水管道都可能是放射性污染源。另外油田为检查注水井的吸水剖面所进行的同位素测井，以及为检查套管井中油层的开发动态所进行的有中子源的放射性测井，都会产生相当规模的放射性污染。表4－24是斯塔夫罗波尔油气区对各种不同液体测定的放射性核素的活度浓度。

表 4－23　石煤渣砖建造的房屋与对照组房屋室内 γ 辐射的吸收剂量率

石煤渣建房屋	组号	房间数目	吸收剂量率 $10^{-8}Gy/h$	普通材料建房屋	组号	房间数目	吸收剂量率 $10^{-8}Gy/h$
	1	83	95.1	1	1	76	9.3
	2	236	64.3		2	90	10.5
	3	62	38.2		3		9.2
	4	111	81.2				
	5	120	70.7				
	6	114	54.1				
	7	105	27.9				
	8		30.0				
平均值			57.7	平均值			9.7

注：Gy/h 是吸收剂量率单位，即单位时间（1h）内生物组织吸收的辐射剂量；

Gy（戈瑞）是吸收剂量单位，每 kg 生物组织受 1J（焦耳）能量辐射时，则该生物组织的吸收剂量为 1Gy。

表 4－24　油田的各类液体中放射性核素的活度浓度

液体种类	镭 ^{226}Ra 的活度浓度，Bq/L	镭 ^{228}Ra 的活度浓度，Bq/L
采油井中的油水混合液	10.0	14.0
油水分离后的油	9.0	10.0
油水分离后的水	8.0	11.6
油水分离后用于注水的水	6.4	9.3
油水分离后的废弃水	8.0	11.6
输油主管道中的油	8.9	9.6

注：油气分离后的天然气中氡的浓度达 $67Bq/m^3$。

从表 4－24 可知，在原苏联的斯塔夫罗波尔油气区，从井下采集到地面的油水混合液的放射性活度浓度已经超过原苏联液体的放射性活度浓度的允许标准（Ra－226：2Bq/L；Ra－228：3.2Bq/L），达到放射性液体废弃物的标准。由于放射性污染严重，在 1:50 万的航空 γ 能谱测量图上呈现大片污染，在该区东部约 $3000km^2$ 的范围内，相当大部分地区的 γ 辐射剂量率为 100～1000μR/h，镭的平均活度达 $1.1GBq/km^2$。

我国大庆油田在开发初期用安—2 式飞机在 45m 高度上进行过航空 γ 辐射测量，发现在油田含水边界以内，γ 辐射呈现负异常，随开发程度增加，油水边界向油田内移动，γ 辐射的负异常区域也相应减小，这说明油田的放射性污染主要来自油田水，通常在还原环境中的高矿化度地层水（油田水）中富含放射性元素。

油气田的放射性污染可能和煤炭的开发一样，是矿产资源开发过程中产生的新的污染。目前我国还没有对这类污染进行系统检测的规划。应该说，对油气田开发过程中的放射性污染进行检测是环境地球物理学科面临的重要课题。

五、放射性检测方法和核物理方法在环境地球物理学科中的其他应用

1. 用中子活化分析法检查大气中的污染物

成都理工大学曾用中子活化分析法检测成都某热电厂排放废气中的有害元素。方法原理

是燃煤及其废气样品中的某些元素在强中子流照射下可生成新的短半衰期的放射性核素，这些新的放射性核素在衰变时会辐射出有一定能量特征的γ射线，可用能谱分析方法测定这些γ射线的强度，并据此测定样品中这些元素的种类和多少。例如钠（$^{23}Na_{11}$）在强中子流照射下会变成放射性钠（$^{24}Na_{11}$），其半衰期为14.8h，衰变时辐射出能量为1.38MeV及2.76MeV的γ射线。可根据在一定时间的中子照射后测定能量为1.38MeV及2.76MeV的γ辐射的强度（计数率）来分析钠（^{24}Na）是否存在并估算其多少。再例如化工厂附近空气中经常有砷化物，砷（$^{75}As_{33}$）在中子流作用下会变成放射性砷（33—As—76），其半衰期为26.8h，衰变时辐射出多种能量的γ射线，可据此识别样品中砷的含量。

中子活化分析的方法是在热电厂附近1.5～2.0km范围内采集大气中气溶胶样品，同时采集该热电厂燃煤、炉渣、粉煤灰和除尘器截流的粉尘样品。然后将样品放在反应堆中在中子通量为$2\times10^{13}/(cm^2\cdot s)$的条件下照射10～20h（当照射时间为新产生的放射性核素的半衰期的3倍时，约有90%核素活化变成新的放射性核素），"冷却"4～6d后，进行第一次γ能谱测量，测量时间2000s，测定新产生的半衰期较短的放射性核素；然后再"冷却"15d，进行第二次γ能谱测量，测量时间4000s，测定半衰期较长的新产生的核素。

对热电厂气体排放物的活化分析表明，锌（Zn）、镉（Cd）、锑（Sb）、硒（Se）、汞（Hg）、钼（Mo）等元素富集在气溶胶的微粒中，大部分随热电厂烟囱排放，可散落在较大的范围内。在距热电厂1.5～2.0km范围内，包含了锌（Zn）、镉（Cd）、硒（Se）、汞（Hg）、砷As）、锑（Sb）、溴（Br）等有害元素，其中锌、镉、锑的丰度超过地壳中该元素丰度平均值（克拉克值）的20倍；硒超过100倍，砷超过15～20倍，汞超过5～10倍。

中子活化分析方法的灵敏度高，测量精度高而且能测定多种元素的含量。但也有一些元素即使在强中子流作用下也不易活化。为此，印度的萨哈核物理研究所提出可进行α活化分析。其方法是将10mL的样品在盘上烘干，然后在回旋加速器中用能量为40MeV的α射线照射1h，再用高纯锗探测器和多道能谱分析仪分析记录γ能谱，这种方法能测定中子活化分析发现不了的铌（Nb）、钽（Ta）、铊（Ti）等元素。尤其铊是重要毒物，并容易形成铊的有机化合物，排放进入大气。

2. 全球气候变化的氧（^{18}O）同位素分析

地球物理学科的重要研究内容之一是用地球物理方法进行地层对比。20世纪50年代以后，发现某些同位素可作为地层对比的标志物，如碳（^{14}C）的丰度的变化可反映地层的年代；后来又发现海洋中深海沉积物中的有孔虫类（牡蛎、珍珠贝等）的钙质沉积中的氧（^{18}O）同位素丰度的变化能反映古海洋海水温度、含盐量、洋流和两极冰盖大小变化，因此有可能通过对某些沉积层中氧（^{18}O）同位素丰度变化的分析来推测或反演古气候的变化。

传统的地球物理学研究对象的特点是小比例尺（相对于环境问题）、大时间跨度（几万年，甚至几十、几百万年）。而环境地球物理学研究的地理区域可能较小，因而要求较大的比例尺，而时间跨度则小到几百、甚至几十年。为了适应对古气候变化研究的需要，即环境地球物理研究的需要，首先要解决的问题是改变传统地球物理学科的采样空间：从以岩石圈为主向生物圈为主，另外要提高观测的灵敏度和精度。如果能实现这些转变，传统的同位素地层分析方法可能在全球气候变化的历史研究只起相当作用。

3. 用核辐射方法处理废弃物

固体废塑料难于降解，因此处理困难。例如，聚四氟乙烯，用生物化学方法无法分解，机械破碎困难，高温加热处理会产生大量有毒的氟化物，是难处理的固体废弃物。国外有报

道介绍，在对聚四氟乙烯加热和机械粉碎的同时用 γ 射线照射，可生成分子量不同的聚四氟乙烯的腊状粉末，可作为润滑剂和添加剂。

木屑、废纸、稻草等废弃物中含纤维素，用 γ 射线照射可使其醣化、发酵而生成酒精。美国在处理纤维素时加酸后用用 γ 射线照射可得到葡萄糖，其回收率可达 56%。另外腐败的食物在放射线照射后可作为动物饲料。

污泥中有大量的生物体是优良的农田肥料和土壤改良剂，但其中的大量病原体使之无法利用，用 γ 射线或电子束照射，可杀灭几乎全部病毒和细菌。美国和德国已经建造了日处理量 1500t 的辐射处理设备。我国拟建立新设备以对医院的废弃物用辐射处理方法，进行彻底的消毒。

用 γ 射线照射生活废水和工业废水会使水中产生 OH、H_2O_2、H 等活性很强的离子，这些离子与废水中的有机化合物作用，可使之分解改性，如含木质素的废水在 γ 射线照射下很容易降解。有文献报道，用 γ 射线照射废水，可使城市污水中的有机碳（TOC）消除 80%～90%；化学需氧量（COD）降低 65%～80%。用 γ 射线照射有利于清除废水中的洗涤剂、有机汞农药、亚硝胺类有害有机物。如果在对废水用常规方法处理（凝聚法、活性炭吸附法、臭氧活性污泥分解法等）的同时，用 γ 射线照射会提高处理效果。对饮用水用 γ 射线照射，还可以消毒。

用电子束照射还可以清除空气中的 SO_x、NO_x。通常为清除空气中的 SO_x、NO_x 是用喷雾器喷撒石灰脱硫，用酸碱吸收清除氮氧化物。目前已经有报道认为可用电子加速器作为照射源，在 80℃ 下加氨辐射，使生成的硫酸胺和硝酸胺由于带电而被静电除尘器吸收。

小　　结

地球生态环境中的放射性物质有三种来源：第一，地壳中放射性矿物释放的放射性核素；第二，由宇宙射线轰击大气或地表中的某些组分而生成的放射性核素；第三，由于人类活动（核试验、核能发电等）产生的放射性核素。在大气圈的对流层中，放射性物质主要由地面放射性矿物衰变产生。

重点介绍了生态环境中的放射性污染氡、氡的危害及其监测问题。它的主要来源是放射性元素铀（^{238}U 及 ^{235}U）、钍（Th）自然衰变的产物。氡的地质来源主要来自于岩石、土壤、地下水、地球深部的放射性元素及其衰变产物延断裂逸出到地面。施用磷肥的土地成为氡的重要来源，每年由燃煤释放到大气中的氡约 10^{13}Bq，花岗岩，特别是酸性花岗岩中铀的丰度高，也是氡的主要发生源。

氡本身具有放射性，主要危害是诱发癌变，尤其是致肺癌危险性极大。国际辐射防护委员会（ICPP）推荐的居民住宅内允许的氡浓度的上限值（150Bq/m^3）。美国环境保护署规定，室内空气中，氡的浓度超过 148Bq/m^3，就应当采取治理措施。俄罗斯联邦政府规定，新建房屋室内氡的浓度应下于 100Bq/m^3，现有房屋室内氡的浓度应小于 200Bq/m^3，若室内氡的浓度高于 400Bq/m^3，而无法降低，则居民应迁出。在我国，规定室内氡的浓度标准为：已建住房氡的浓度不超过 200Bq/m^3，新建住房不超过 100Bq/m^3（GB/T16146—95）。

介绍了三中氡的监测方法：（1）航空 γ 能谱测量结合航空磁测、航空电测、地面 γ 测量及车载 γ 测量测量；（2）我国环境部门进行氡测量所用的方法双滤膜法；（3）活性炭吸附法。

核辐射探测方法在环境监测中的应用：(1) 自然放射性背景值调查；(2) 核事故的污染监测；(3) 追踪核动力卫星宇宙—954 (KCMOC—954) 陨落后碎片。另外，还详细介绍了建筑材料放射性污染的检测和评价以及矿产资源开发过程中的放射性监测。指出对油气田开发过程中的放射性污染进行检测是环境地球物理学科面临的重要课题。

介绍了放射性检测方法和核物理方法在环境地球物理学科中的其他应用：(1) 用中子活化分析法检查大气中的污染物；(2) 全球气候变化的氧 (^{18}O) 同位素分析；(3) 用核辐射方法处理废弃物。

最后介绍了利用核磁共振方法检测水中的污染物的实验情况并作了讨论。

思考题

(1) 核辐射探测方法在环境监测中有哪些具体应用?

(2) 核废料应怎样科学而安全地处置?

(3) 在日常生活中应怎样避免辐射的照射?

第五章　环境磁学——磁学方法在环境问题中的应用

环境磁学研究在自然界演化过程以及人类活动引起环境变化时磁信息的改变（正演问题），并以对磁信息的观测为依据评价环境的变化（反演问题）以及对人类活动的影响．地球上观测到的磁信息都与地球本身的磁场、太阳及其他宇宙体对地球的的电磁作用有关，同时地球上的物质，尤其是地壳内不同的矿物和岩石在磁学性质上有明显的差异，因此在自然界演化和人类活动的过程中，其磁信息改变也有差异，因此首先要对地球的磁场及地壳中物资的磁性进行说明和讨论。

第一节　地球磁场的一般表述

人类对地磁场存在的认识，来源于磁针和天然磁石指极性的观察：磁针的北极（N 极）受地球北磁极（磁性为 S 极）吸引而指北；磁针的南极（S 极）受地球南磁极（磁性为 N 极）吸引而指南．根据对这一现象的观察，发明了司南、指南针、罗盘等能帮助人类在航海和陆地上识别方向的工具。继之而来的问题是地磁场的起源、地球的磁异常、地壳中物质的磁性等一系列问题。

一、地球磁场的起源

早在公元 1600 年，英国人吉尔伯特（W. Gilbert，女王伊利沙白一世的医生）提出，地磁场来源于地球本身，他制作了一个大的球形磁石，并在其表面附近放了一些小磁棒。他发现这些磁棒的取向像地球表面的磁针一样。吉尔伯特由此提出，地球本身是一个巨大的磁石，并以此解释地磁场存在原因。

根据现代科学的观测结果，认为地球的磁场来源于地球本身的观点是正确的，但认为地球本身是个大磁石的推论却不成立。这是因为在地表以下 100km 处，进入以橄榄岩为主要成分的地幔，温度约 1100～1200℃，接近该处岩石的熔点；在 400km 和 650km 深处，岩石发生相变，在 400km 处，温度为 1500℃；在 650km 处，温度为 1900℃，所有矿物都分解为钙钛矿和氧化物结构。在地幔和地核物质交界处温度达 3700℃，高于铁的熔点。在距地表 5100km 处，地球内核和外核交界处，温度可达 4300℃。这些温度，超过了在地球深部任何铁磁性物质的居里点（铁：770℃，镍：355℃；超过此温度时，铁磁性物质失去磁性，见下文），因此地幔以下的物质不可能是以磁石的形态存在。如果仍要坚持认为地球是一个大磁石，则其模型必须是在 30km 的地壳表层内，主要物质是纯磁铁矿。这显然与地壳的实际情况不符。

目前使人比较容易接受的地磁起源理论是自激发电机假说。该理论认为，地球的地核部分主要是由流体态的、导电的铁镍物质组成。由于这些导电流体的旋转运动产生磁场，导电流体在磁场中运动又产生电流。这样在地核内相当于有一个自激的发电机在不断发出电流，从而产生地磁场．对于自激发电机的能量来源，可认为有以下几种可能：地核中放射性元素，如钾（^{40}K）衰变时释放的热能；地球深部化学和重力分异作用产生的热能；液态地核的某些部分凝固时放出的潜热；地球自转时，由于地幔和液态地核间相对运动产生的机械能。

二、地磁要素和磁场基本物理量

1. 地磁要素

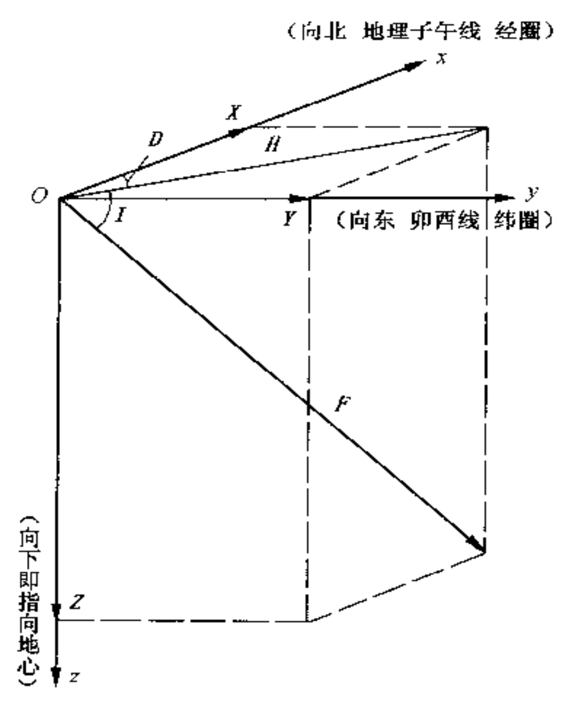


图 5－1 地磁要素示意图

在图 5－1 中，O 为地表上的某个观测点，在直角坐标系中 O_x 指向地理北，O_y 指向地理东，O_z 指向地心（垂直向下）。F 为观测点 O 处的地磁场总强度，H 为 F 在水平面上的投影，即磁场强度的水平分量；X 为 H 在 O_x 轴上的投影，称为磁场强度的北向分量；Y 为 H 在 O_y 轴上的投影，称为磁场强度的东向分量；Z 为 H 在 O_z 轴上的投影，称为磁场强度的垂直分量。D 为 H 偏离 O_x 轴（地理北）的夹角，称为磁偏角，向东偏为正；I 为 F 与水平面的交角，称为磁倾角。F、Z、H、X、Y、I、D 为地磁场的七个要素，其间关系是：

$$X = H\cos D \qquad Y = H\sin D \qquad Z = H\operatorname{tg} I$$

$$H_2 = X_2 + Y_2 \quad F_2 = H_2 + Z_2 = X_2 + Y_2 + Z_2$$

$$H = F\cos I \qquad Z = F\sin I$$

$$X = F\cos D\cos I \qquad Y = F\sin D\cos I$$

在地磁场的七个要素中独立的仅有三个，换句话说，一个矢量可用三个分量表示，通常在地磁台站，记录的是总磁场强度 F 的三个坐标方向的分量 X、Y、Z，或是磁场的水平分量 H、磁偏角 D 和垂直分量 Z。

地磁场是个弱磁场，大量观测结果得出，全球平均磁感应密度约 0.5G。因为地球可近似视为球体，因此地磁场的强度（磁感应密度）在两极最大，约为 0.6～0.7G，其垂直分量也是在两极附近最大，在赤道附近最小；而地磁场的强度在赤道附近最小，约 0.3～0.4G，但其水平分量 H 则是在赤道附近最大，而在两极附近最小。表 5－1 是东经 20°处（穿过斯德哥尔摩、华沙），北纬 45°～55°区域内的地磁场水平分量。

表 5－1 北半球东经 20°，北纬 45°～55°的地磁水平分量

位置，北纬，N°	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
地磁水平分量 G	0.225	0.219	0.214	0.210	0.205	0.201	0.195	0.191	0.186	0.183	0.178

2. 磁场的基本物理量

磁场的强弱用磁感应强度 $\boldsymbol{B}$（也称磁通量密度）表示。磁感应强度矢量 $\boldsymbol{B}$ 的定义是按载流导线在磁场中受力的安培定律导出的，在长度为 L 的载流导线上通过的电流强度为 I，则在均匀磁场中受到的作用力为（作用力与电流方向和磁场方向组成的平面垂直，作用力方向与电流方向有关）：

$$\boldsymbol{F} = IL\boldsymbol{B}\sin\alpha \quad（\alpha \text{ 为磁感应强度方向与电流方向的夹角}）$$

当磁感应强度方向与电流方向垂直时（$\alpha = 90°$），有：

$$F = ILB \qquad B = IL/F$$

B 在国际单位制（SI 单位）中的单位为：N/（A·m），（牛顿/（安培·米））[3]，记为 T（特斯拉），由于这个单位太大，通常用 nT（纳特）做单位，$1nT = T/10^9$。在地磁测量中，习惯用的单位是 γ（伽马），在绝对电磁单位制中，磁感应强度的单位是高斯（符号为 G 或 Gs），高斯与特斯拉及伽马的关系是：

$$1G = 10^{-4}T = 10^5nT, \qquad 1\gamma = 10^{-5}G = 10^{-9}T = 1nT$$

可传导磁场的介质叫磁介质，表示磁介质传导磁场能力的参数叫磁导率，记为 μ。真空中的磁导率记为 μ_0，任何一种介质的磁导率 $\mu = \mu_r \times \mu_0$，式中 μ_r 是个无量纲数，也叫相对磁导率。μ_0 是真空中的磁导率，为固定值，其物理意义类似于电学中真空中的介电常数 ε_0。

$\mu_r > 1$ 的物质叫顺磁质，例如钾、钠、钡、钙、镁、锰等和空气、硬橡胶等。

$\mu_r >> 1$ 的物质叫铁磁性物质，如铁、钴、镍。铁磁性物质的磁导率 μ 随外磁场的强弱发生变化，例如，铁在 $B = 5800G$ 时 $\mu = 5800$，而当 $B = 20000$ 时，$\mu = 200$。

$\mu_r < 1$ 的物质叫抗磁质，如铜、金、硅、石墨、金刚石、石英、玻璃、水、石油、甘油、乙醇、乙烯等。

表 5－2　部分金属的磁性与相对磁导率

金属种类或合金成分	磁　　性	相对磁导率（μ_r）
铋	抗磁性	0.99983
锑	抗磁性	0.9993
铜	抗磁性	0.999991
银	抗磁性	0.99998
铀（20℃）	顺磁性	1.0004
铝（20℃）	顺磁性	1.000022
铂（20℃）	顺磁性	1.00026
钴①	铁磁性	250
镍①	铁磁性	600
硅铁①（4%硅）	铁磁性	700

①钴、镍、硅铁的相对磁导率随外加磁场变化。

根据电磁场理论可知，运动着的电荷能产生磁场，例如螺线管在通电时能产生磁场。如在螺线管中加入铁心，则在同样电流强度条件下，产生的磁场加强，磁感应密度 B 加大，这是由于铁心在螺线管产生的磁场中被磁化后，又增强了磁场的缘故。磁场增强的幅度与加进螺线管的介质的磁导率 μ 有关。这时磁感应密度是运动电荷和介质磁化两方面贡献之和，为了描述运动电荷对磁感应密度 B 的贡献，定义磁场强度。

$$H = B/\mu, \text{或 } B = \mu H$$

即磁场强度是磁场中某点磁感应密度与磁导率的比值。

当一个小磁体的轴与外磁场方向垂直时，单位磁感应强度对小磁体作用的转动力矩称为磁矩。由于磁场还可能使通电的平面线圈发生转动，因此规定单位磁感应强度对平面载流线圈的转动力矩为载流线圈的磁矩，磁矩是矢量，记为 m，$m = ISn$，式中，I、S 为载流平面线圈中的电流强度和面积，n 为按右手螺旋法则确定的法线方向上的单位矢量。在单位体

积磁介质中所有磁体的磁矩之和（矢量和）或单位体积内平面载流线圈磁矩之和（矢量和），叫做磁化强度。磁化强度是表示介质被磁化程度的物理量。显然，在外磁场作用下，磁介质中的磁矩越大，说明其被磁化程度越高，则其磁化强度越大。因此磁化强度是表示介质被磁化程度的物理量，由于磁矩是矢量，因此磁化强度也是矢量，记为 M。M 和磁场强度 H 成正比，在各向同性介质中，有：

$$M = \chi_m H$$

χ_m 是介质的磁化率，是无量纲数。χ_m 与 μ_r 的关系是 $\chi_m = \mu_r - 1$。对顺磁性物质，$\mu_r > 1$，$\chi_m > 0$，对抗磁性物质，$\mu_r < 1$，$\chi_m < 0$。自然界中各种岩石矿物和人类活动产生的物质，其磁化率差异明显，如粉煤灰中含少量磁铁矿（Fe_3O_3），其质量磁化率 χ（单位质量磁介质的磁化率）可达 104，而黏土的质量磁化率仅 0.7～1.13。

铁磁性材料的特点是有磁滞现象，即铁磁性物质在外加磁场作用下磁化后，即使取消外加磁场，铁磁性物质的磁感应密度并不减小为零，即有剩磁。

所有的铁磁性物质在一定的温度下都会失去磁性，这一温度叫居里点（在同一温度下材料的弹性也消失）。

表 5－3　部分铁磁性物质的居里点

材料名称	居里点，℃	合金化学成分	居里点，℃
铁（Fe）	770	0.22Fe＋0.78Ni	550
硅铁（4.3%Si）	690	0.50Fe＋0.50Ni	420
钴（Co）	1180	0.70Fe＋0.30Ni	70
镍（Ni）	355	0.49Fe＋0.49Co＋0.02V	980
磁铁矿（Fe_3O_4）	572	0.70Ni＋0.30Cu	100
碳化铁（Fe_3C）	212	0.61Cu＋0.26Mn＋0.13Al①	330

①又名盖依斯列尔合金。

含有磁性矿物的岩石在其沉积过程中（沉积岩）或冷却过程中（岩浆岩），因受到当时当地地磁场的作用而保留剩磁；另外古代留存到今的瓷器、砖瓦等，其中可能含有铁磁性矿物，这些材料经过焙烧，失去原来磁性，在其冷却过程中又受到当时当地地磁场的作用，而保留剩磁。对这些物质中的剩磁进行测定是研究当时、当地磁场强弱和方向的重要根据，是研究当时地质环境和物理环境的重要信息，已经发展成为地磁学的重要分枝——古地磁学。

三、地球的基本磁场和变化磁场

地球的磁场包括起源于地球内部、变化缓慢（长周期变化）强度大的基本磁场和起源于地球以外、变化迅速（短周期变化）强度弱的变化磁场两部分。

1. 地球基本磁场

地球的基本磁场包括偶极子磁场、非偶极子磁场、地磁异常三部分。其中偶极子磁场是地球基本磁场的最主要部分，约占地磁场的 90%，产生于地球液态外核的导电体流动过程。偶极子磁场的特征是在地磁两极的地磁强度是在地磁赤道处的两倍。而且从地磁两极到赤道，地磁强度有规则地减小，相当于一个偶极子的磁场，偶极子的两极为地磁的两极，偶极子的中心在地心。

非偶极子磁场主要在亚洲东部、非洲西部、南大西洋和南印度洋，约占地磁场的 10%。其中最强的几个区域是：东亚大陆正异常（又称蒙古异常）、非洲负异常、南大西洋和南印

度洋正异常。其中强度最大的是南大西洋正异常，1995年强度为22582.8nT。我国在东亚异常区内，该异常的特点是强度逐年增大，中心位置缓慢向北漂移。2000年异常中心位于E130.5°、N44.1°处（在蒙古境内），强度为18449.8nT，和1900年的15212.6nT相比，大约每年增加32.4nT。与1900～1940年的平均纬度N43.1°相比，中心的纬度则缓慢北移。从1990年以后，由于非洲负异常区强度增加，目前是强度最小的异常。

非偶极子磁场的来源是个有争议的问题。传统的看法是在地球的地幔和地球外核的交界处，但也有人认为是早期侵入的岩浆冷却后磁化的结果。

地磁异常则是由地壳内有磁性的岩层和矿体产生的异常，按其规模，有区域性的，有局部性的。

根据观测结果，地磁场是在变化过程中。一是磁极的位置（或方向）在变化，可用图5－2示意说明。在图5－2上，N为地理北极，Nm为地磁北极。地磁北极和地理北极并不重合，在一般情况下地磁北极Nm是在地理北极N附近移动（相应的地磁南极Sm也在地理南极S附近移动），偏离的角度α一般在20°以内（每年约向西偏移0.2°～0.3°，这叫西向偏移，由于偏移的积累，目前α约11.5°，由于地球基本磁场的这种变化，每过几年要重新编制地磁图，并注明年变率）。在地球的演化发展过程中，地磁北极曾经多次跨过赤道，甚至到达地理南极附近，这叫做地磁极性倒转。地磁北极在地理北极附近的时期叫正极性期（现代地磁场正在正极性期内），地磁北极在南半球地理南极附近的时期叫反极性期或倒转期。地磁极性的转变不是瞬时的，极性倒转有长短不等的周期，而且地磁极性的变化可被储存在古代岩石中，以不同时期岩石的剩磁的形式保存下来。20世纪60年代末，古地磁学家根据对古代岩石剩磁的测定编制了近450万年的地磁极性年表，20世纪80年代以后又编制了追溯到1.68亿年前的地磁极性年表，在此年表中记录了1.68亿年以来地磁场发生过的62次正、反极性时期。在地磁极性年表中，持续时间为10～100万年的极性转变叫极性期或极性时；持续时间为10000～100000年的极性转变叫极性事件或极性亚时。近年的研究发现两个持续时间为几千万年长周期内极性转变缓慢的“超时”。其一是石炭纪—二叠纪（313～227Ma）的反极性超时，其持续时间长达86Ma；另一个是白垩纪正极性超时（118～83Ma），其持续时间35Ma。

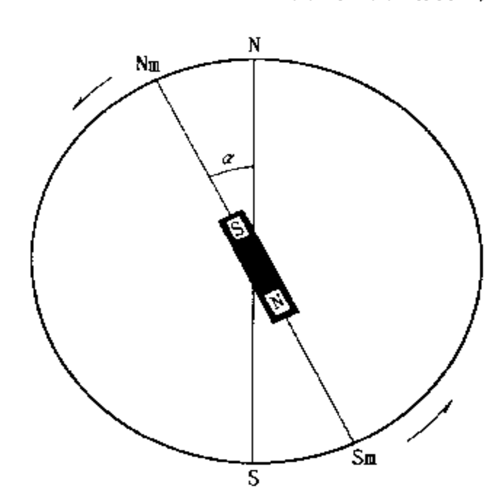


图5－2　地磁两极偏离地理两极及地磁极性变化示意图

除了极性方向的改变外，地磁场的强弱（磁感应密度）也会发生改变。图5－3为中国北京地区2000年来地磁场磁感应密度的变化，表5－4为北京地区近2000年来古地磁感应密度的数值。

表5－4　北京地区近2000年来古地磁感应密度的数值

朝　代	汉	三　国	唐	宋	元	清	现　代
地磁感应密度，G（高斯）	0.86	0.77	0.78	0.71	0.57	0.58	0.55

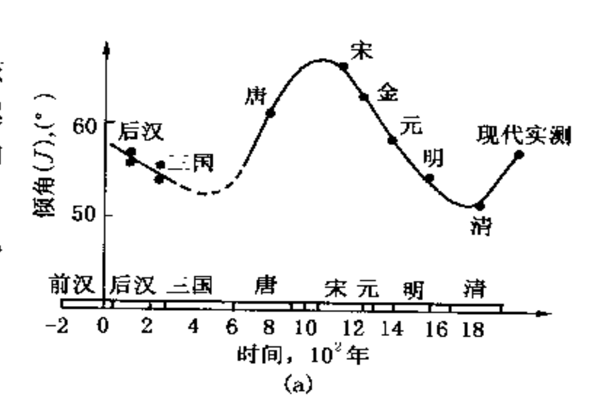
从图 5－3 及表 5－4 可见，2000 年来，北京地区地磁场的倾角有周期性变化，同时的磁感应密度在逐渐减小，现代约 0.55Gs（5500nt）。国外近年的研究表明，从公元 1670 年以来，地磁场已经减弱了 15%，按这种速率变化，约 4000 年后地磁场将“消失” 但多数人认为，地磁场的减弱是其不稳定的表现，也有人认为，地磁场正在重复以往发生过的极性倒转。表 5－5 中地磁场的变化都是地球内部原因所引起的。

表 5－5 地球基本磁场变化分类

变化类型	持续时间（周期），a	变化幅度，nT
最小可观测周期	3.7	
磁极移动	1000～10000	
地磁极性转变	1000～10000	100000（1G）
地磁偶极矩震荡	约 10000	
磁场长周期变化	0.1～1Ma	
地磁极性倒转持续时间	0.1～10Ma	

2．地球变化磁场

与内源性的地球基本磁场相比，地球变化磁场主要是外源性的，即主要受太阳活动影响引起地磁场变化。地球的变化磁场可分为平静变化和干扰变化两类。平静变化包括变化幅度为 10～100nT 的以一个太阳日为周期的太阳静日变化（S_q），以及变化幅度为 1～3nT 的以一个太阴日为周期的太阴静日变化（L）。其变化的场源在地球大气圈电离层内的永久性导电系统。



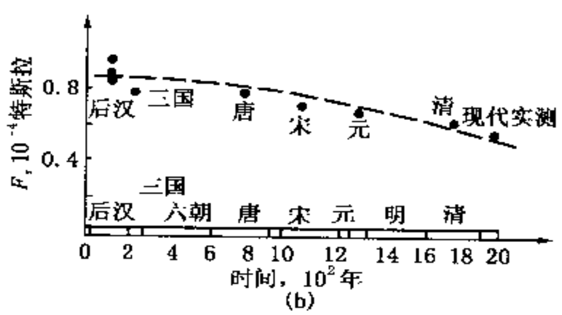


图 5－3 中国北京地区 2000 年来地磁场变化

地球变化磁场的干扰变化包括磁暴（Dst）、地磁亚暴、太阳扰日变化和地磁脉动等。场源是太阳的离子辐射。由于太阳辐射出的离子与地磁场相互作用，在电离层和磁层中会产生电流，因而引起地磁场变化。其中磁暴是全球同时发生的磁干扰，持续时间为 1～3d，幅度可达 100nT。地磁亚暴是在两极附近的极光区域发生的局部磁扰，持续时间 1～3h，变化幅度为 100～1000nT。太阳扰日变化（S_d）也是以一个太阳日为周期，主要发生在极光区域，变化幅度 10～100nT。地磁脉动是地磁各种短周期（从 0.2s 到十几分钟）的变化，变化幅度 1～100nT，持续时间几分钟至几小时。地球变化磁场也有内源部分：这是由于外源场在地球内部诱发的感应电流所产生。根据地磁场的脉动，可研究地球内部导电层和电导率的分布，并成为地磁学的一个分枝——地球电磁感应。地球变化磁场既与太阳活动在电离层和磁层中引起的电磁作用过程有关，也与地球内部地壳和上地幔的导电层分布和结构有关。

表 5-6 地球变化磁场分类

变化类型	变化周期和持续时间	变化幅度，nT
太阳静日变化（Sq）	24h	10～100
太阴静日变化	约 24h	1～3
磁暴	1～3d	100
磁亚暴	1～3h	100～1000
太阳扰日变化（Sd）	24h	10～100
地磁脉动	0.2～150s 以上	1～100

四、岩石的磁性

1. 岩石磁性的来源和磁性矿物的分类

岩石的磁性主要由岩石所含铁磁性矿物而来。通常用磁化强度 M 来描述岩石的磁性。如前所述，磁化强度 M 是个矢量，是单位体积介质中磁矩的总和。岩石的磁化强度 M 包括感应磁化强度 M_i 和剩余磁化强度 M_r 两部分，即：

$$M = M_i + M_r$$

式中 M_i 为岩石在磁场 H 中被磁化时获得的磁感应密度，有：

$$M_i = \chi_m H$$

式中，χ_m 为岩石的磁化率，与岩石所含铁磁性矿物的成分、含量和分布状况有关，还和岩石的物理环境（温度等）、地理位置、磁化历史有关。当外加磁场取消后，岩石的磁化强度并不为零，即岩石经磁场作用后仍能保留部分剩余的磁化强度 M_r 及仍有可观测到的磁感应密度，这就是岩石的剩磁。已经有剩磁的岩石还可能被再次磁化，并获得新的剩磁，年代久远的岩石往往有多个剩磁。对岩石进行逐次退磁处理，可以把各个时代产生的剩磁分离出来，从而追溯岩石磁化的历史，并推论岩石变化的环境。

岩石的磁化率是个无量纲的数。前已述及，对顺磁性和抗磁性物质，其相对磁导率 μ_r 分别为＞1 及＜1。由于 $\chi_m = \mu_r - 1$，而且 μ_r 的数值略大 1（顺磁性物质）或略小于 1（抗磁性物质），因此，对顺磁性物质磁化率 χ_m 为正值，在室温下数量级为 10^{-4} 以下，说明顺磁性物质由于其内部磁偶极矩排列整齐所引起的磁感应密度增强与外加磁场相比，是很小的。顺磁性物质在外加磁场取消后，其所有的磁化立即消失。抗磁性物质，磁化率 χ_m 为负值，数量级也为 10^{-4}。将抗磁性材料（如铋制棒体）放在外加磁场中时，外加磁场的一部分会被排斥出铋制棒体之外。常见的顺磁性矿物有 S 辉石、生云母和角闪石等；石英、长石则是常见的抗磁性矿物。铁磁性矿物是指某些有特殊结构的矿物，这些矿物的原子有很强的固有磁矩，相互作用很强，使矿物内部的晶格有一定的排列，形成有一定磁化的、习惯上称为磁畴的小区域（线度约 10^{-4}cm）。这类矿物的磁化率很高，而且不是固定值，随外加磁场的强弱而改变，在外加磁场取消后，仍保留有相当的剩磁。有的铁磁性物质，其磁化率高达 1000 以上，说明在这些材料内部磁化强度可比外加磁场高 1000 倍以上。铁磁性矿物多为铁的氧化物或硫化物，而且可分为两类：一类是强磁性立方晶型氧化矿物，如磁铁矿、磁赤铁矿、钛磁铁矿；另一类是弱磁性的菱形六面体矿物，如赤铁矿、钛铁矿、磁黄铁矿等。

2. 岩石的剩磁及分类

铁磁性物质在其温度升高时，随热运动加强，原来的晶格有序排列破坏，磁畴发生衰

乱，在温度达到居里点时，物质呈现顺磁特性，即外加磁场取消时，不再具有磁性。在温度高于居里点时外加磁场对铁磁性矿物进行磁化，并逐步降温到居里点以下，此时若取消外加磁场，铁磁性矿物将获得永久性的剩磁，称为热剩磁（TRM）。如果在外加磁场中继续冷却，则铁磁性矿物在每个下温度区域都可获得局部热剩磁（PTRM）。热剩磁的强度大而且稳定。如果在岩石中有多种矿物，由于每种矿物的居里点不同，则对应于每种矿物的居里点，都有相应的特征热剩磁。这种热剩磁在岩浆岩中表现明显、多见。

除了热剩磁以外，还有以下几种剩磁：

等温剩磁（IRM）在远低于居里点的恒定温度（如常温）下，岩石受较强外加磁场磁化而获得的剩磁，叫做等温剩磁，简称 IRM。和热剩磁相比，等温剩磁的强度低，也不够稳定。

化学剩磁（CRM）在常温下，在较弱的外加磁场中，若岩石中的矿物成分发生化学反应（如某些矿物在风化过程中，由于氧化生成氧化铁等）、发生相变、结晶结构增长，因而其磁化率的改变所获得的剩磁叫做化学剩磁，简记为 CRM。化学剩磁的强度和稳定性都与热剩磁相近。

粘滞剩磁（VRM）在常温下在较弱的外加磁场中，由于在长达几百万年（Ma）的时间内，岩石中磁性矿物的磁畴受到规则的热扰动而产生的剩磁，叫做粘滞剩磁，简记为 VRM。粘滞剩磁与等温剩磁相比，较强也较稳定。

无滞剩磁（ARM）岩石同时受到交变磁场和恒定磁场作用，当交变磁场逐渐减小到零时所获得的剩磁，简记为 ARM。

压应力剩磁（PRM）岩石在受到外加磁场作用时又受到周围岩石的挤压作用，使岩石变形，同时岩石中铁磁性矿物中的磁畴重新排列所获得的剩磁，简记为 PRM。

碎屑剩磁或沉积剩磁（DRM）已经磁化过的岩石碎屑在经过搬运在海底或河湖中沉积时，以及大气降尘的某些磁性物质（如粉煤灰）在沉积时，受到外磁场作用，使岩石碎屑定向排列而获得的剩磁，简记为 DRM。这种剩磁相当稳定，是沉积岩中特有的剩磁参数。

通常岩石在成岩过程中受到当时、当地地磁场的作用而被磁化，并产生剩磁，因此在原生岩石中保留了沉积岩成岩地质年代的磁场方向、磁感应密度的强弱等古地磁信息，在采集这些岩石的原生标本后，对其剩磁进行测定，并对去稳定性进行评估，就可反演沉积岩生成地质年代的古地磁场特征。根据测定的岩石的古地磁信息和已知的地磁极性年表对比，还可确定岩石或化石的生成年代。因为地磁场的极性变化（或倒转）是全球统一的，因此可在全球范围内进行对比。

除了岩石以外，古代陶瓷、砖瓦、炉窑中所含的一些矿物，甚至古动物化石中也可能有与岩石类似的剩磁。因此古地磁学方法可以推广到考古学等领域。例如，我国元谋猿人的生存年代就是用古地磁方法确定的。

第二节　磁场对生物和生态环境的影响

地磁场是地球上始终存在的物理环境因素，总是和其他环境因素如空气、水、重力、太阳辐射一起作用于地球上的一切生物和生命过程，乃至生物的每个器官、组织、细胞及生物分子。另一方面，生物组织都由弱磁性物质组成，其活动必然受到地磁场的影响。动物的心脏、脑、眼睛、肌肉活动都会产生电流（生物电流），从而也产生磁场。总而言之，地球上

的一切生命活动都不可避免的受到地磁场的影响，生命活动也会产生磁场。同时，地磁场作为一种物理环境也会对整个地球的生态环境发生影响。

一、磁场对生物和生命过程影响的若干事例

全面、系统讨论磁场对生物和生命过程影响，这样一个很大和复杂而且现代科学并未完全解决的问题，出了本书的范围，因此只能列举若干事例，说明问题的各个方面。

1. 生物体内的强磁性物质对生物运动行为的影响

人类早就发现鸽子能从几百、甚至上千千米处飞回住所，这就是定向功能。后来发现蜜蜂、蝴蝶、海豚、鲸鱼也有定向功能，并猜测这些功能与生物的磁场有关。20 世纪 70 年代中期，发现了一种能在水中逆磁力线方向运动的“趋磁菌”，在这种“趋磁菌”体内，又发现微量强磁性的 Fe_3O_4 微粒，其直径约 50nm，与一个单磁畴的线度 40～120nm 相符。不同菌体内，有 20～50 个这样的强磁性物质排列成的“磁石链”。这种“磁石链”的磁能甚至大于室温条件下的热能，从而使“磁石链”能准确地沿地磁场方向排列，以至能准确地沿地磁方向运动。

20 世纪 70 年代后期又陆续发现在蜜蜂、蝴蝶、鸽子、海豚、鲸鱼体内发现微量的强磁性物质 Fe_3O_4，甚至在人的鼻窦壁下面都有微量的 Fe_3O_4 发现。这可能是某些动物和人能维持定向运动的原因。

国内外都有研究表明，地磁场的变化还可能引起人类活动或行为的异常。国外甚至有人提出，太阳黑子活动对股票市场都有影响。国内有统计资料认为，磁暴和交通事故之间也有关系：1989 年 3 月 13 日 01 时 25 分开始，发生级别达 9 级的强烈磁暴，其磁干扰最强的时间是 3 月 13 日 09 时～12 时，15 日 22 时干扰终止，3 月 16 日又发生一次 7 级磁暴。在磁暴期间，昆明的交通事故明显上升，3 月 13 日交通事故比 12 日增加 300%，14 日、15 日比 12 日增加 100%，16 日比 12 日增加 200%。

对我国某大型工业企业 1981～1983 年工伤事故的统计分析后认为，工伤事故多发生在磁暴日，在强磁暴日的工伤事故发生率是静磁日的 2.67 倍。

至于磁暴对工业输电、宇航飞行、人造卫星的影响在第二章中已有记述，此处不再重复。在以各种海难和空难事故闻名的百慕大三角区，即美国南部海岸、百慕大群岛和安的列斯群岛之间的海域，从 19 世纪以来，据说已有 50 多艘船只和 20 余架飞机在此“神秘失踪”，其原因至今尚未查明。据对有关失事飞机和船只情况报道，在失事前都有罗盘定位失灵的现象。因此不排除在该区有区域性的强磁异常，而这种强磁干扰可能是海难和空难的重要原因。

2. 磁场对动物性别的影响

在雌雄异体的动物群落中雌性和雄性个体数目大体相等，动物的种群得以繁衍。动物的性别与细胞核内性染色体有关。但动物的性别是在发育过程中形成和表现的，因此除了受到性染色体的影响（内因性的）外，也会受到发育环境和条件的影响。地磁场作为地球上始终存在的物理环境，也可能对动物的性别产生（外因性的）影响。有人对鸡的胚胎发育进行过研究，发现在天然地磁场中孵出的小鸡雌雄数目基本相等。但在由一组线圈补偿地磁场，另一组线圈产生人工磁场的特殊环境中所做的试验表明，当胚胎的头部向人工磁场的南极时，孵出的小鸡雌性多于雄性；当胚胎的头部向人工磁场的北极时，孵出的小鸡雄性多于雌性。这说明磁场的变化可能引起动物群落性别的失调。

根据上述地磁场改变可能引起生物群落性别失调的假说，对 6500 万年前恐龙灭绝的种

种猜说（小流星或彗星撞击地球说、宇宙射线激增说、全球气候变化说、生存竞争失败说、神经系统传导失灵说等）中，又增加了一种性别失调说。其根据是，恐龙灭绝的时代正是地磁极性倒转的时期，这一过程要几十万年或更长时间才能完成，这与恐龙灭绝时间数百万年（Ma）在数量级上一致。在恐龙灭绝过程中恐龙蛋化石越来越多，这是恐龙的性别失调的结果：由于地磁场的变化，使雄性恐龙数目减少，不能孵化的未受精蛋越来越多。

3. 地磁场及其变化对人体健康和某些疾病的关系

医学研究表明心血管疾病的发病率除了与性别、年龄、民族、职业、饮食习惯、精神状况、体育活动等因素有关外，还可能与环境因素，即：年平均气温、日照时间、空气污染、水质、微量元素的摄入等有关。此外，还可能与地磁场的分布有关。根据我国冠心病、高血压患者多于南方的统计结果，有人提出冠心病和高血压的高发病率区域可能与东亚大陆地磁异常区（蒙古异常区）分布有关，即在东亚大陆地磁异常区内及附近，冠心病、高血压等心血管疾病的发病率高，而远离东亚大陆地磁正异常区的区域，心血管疾病的发病率明显低于异常区。

有人研究过我国东北某地克山病发病率与太阳黑子活动引起的地磁场变化的关系。统计分析结果认为，克山病和高血压发病率与太阳黑子活动变化趋势一致，即太阳黑子活动期克山病和高血压的发病率和死亡率都高；磁暴引起的地磁干扰对持续性的高血压患者的舒张压和收缩压都有降压作用；地磁干扰则有诱发冠心病患者急性发作的效果。

顽固性头疼是一种久治难愈的疾病，用药物治疗容易引起对药物的依赖性，而且很难根治。但有病例表明，只需改变睡眠（床）的方位，就有药物难以达到的效果。有人认为，睡眠时床的方位应该尽量取南北方向，与地磁场方向大体一致。

4. 人体磁场研究

人的心、脑、眼、肌肉活动都会产生生物电流从而也会产生磁场；另外人体的某些部位也存在微量的强磁化物质也会产生磁场。人体中各脏器随时间或随其机能的变化，也会产生相应磁场的变化。将这种变化记录下来可以得到人体的磁图，如心磁图、脑磁图（类似于心电图、脑电图）、眼磁图等。这些磁图记录到的磁感应密度虽然很弱（0.0001～1.0nT），而且容易受到地磁场的干扰，但更容易反映出人体某个脏器的生理和病理特征，而且不像心、脑电图等存在电极接触干扰，对某些疾病的确诊率高，例如对心室肥大症和高血压，心磁图的确诊率为55%和40%，比心电图的确诊率高得多（仅为13%和20%）。

目前用磁疗方法治疗炎肿、肌肉扭伤等有一定疗效。还有许多磁疗保健品（磁化杯、磁疗枕、磁疗鞋、磁疗手表等），据说对某些疾病有疗效（如对高血压），但磁场对生物和生命影响的许多问题还有待认识，磁疗的生物物理机制也有待进一步研究。

5. 磁生物技术

由于经磁场处理过的水的电导率、渗透压、表面张力都有增加，黏度降低，溶解氧含量、pH值等都有改变，经磁场处理过的水（磁化水）对水中盐类沉积有抑制作用，对体液中结石有抑制和溶解作用；对生物体内某些酶（淀粉酶、葡萄糖氧化酶、酯酶等）的活性增强。因此磁化水也可能提高生物细胞的自身特性和免疫功能。以此为基础发展起来的生物磁技术已经在某些应用方面取得成功，尤其是在农业方面。

在农业方面应用取得成功的磁技术包括用较强磁场处理农作物的种子；用磁化水灌溉；在肥料中加入适量磁性物质，增加农作物的营养成分的吸收，有试验资料表明对经济作物、果树等用磁性肥料能增产10%。由于粉煤灰具有磁性，因此可用火电厂的粉煤灰作为土壤

的改良剂。粉煤灰中的磁性物质不易被吸收（因此其磁效可维持2～3季农作物生长），但由于能增加农作物根部的磁性使其生物活性和对营养物质的吸收改善，从而达到增产的目的。

20世纪90年代用较强磁场处理食用菌菌种，可使食用菌增产。为此要对菌种施加适当强度的磁场，以及合适的处理时间，可使食用菌增产10%～50%。

表5-7　食用菌菌种磁处理的磁感应密度和增产效果

食用菌种类	处理菌种的磁感应密度，mT	增产率，%
蘑　菇	150～300	20～30
平　菇	100～500	10～32
香　菇	100～350	10～25
黑木耳	50～250	20～50
灵　芝	80～250	11～50
猴头菇	200～800	16～35

注：资料转引自：王兴孔等：新概念普通物理学，石油工业出版社，1998。

从表5-7可见，不同菌种处理磁场有相当重叠区，是该技术推广的有利条件。另外，还可以使用经过磁化处理的水浇灌生长期的菌种，也可增产10%～30%。

二、地磁场变化对全球气候的影响

有研究表明，地磁场的变化和全球气候变化之间存在一定关系，即地磁场极性的变化（倒转）和地磁场强度的变化都对全球气候发生影响。

1. 地磁场极性变化与气候变化

地磁场的每次极性倒转都同时发生气候变化，在过去地质时期和在距离现代最近的第四纪都是如此。

表5-8　近450万年以来地磁极性年表（根据Mankinen，1979）

极性时	时间，Ma	极性事件	时间，Ma
布容正极性时 (Brunhes) (第四纪)	0.73～0	蒙戈事件 拉尚事件 布莱克事件	0.03～0.02 0.06～0.03 0.117～0.104
松山反极性时 (Matuyama) (第四纪)	2.48～0.73	贾拉米洛事件 吉尔萨事件 奥尔都维事件	0.97～0.90 1.87～1.67 2.14～2.01
高斯正极性时 (Gauss)	3.40～2.48	凯纳事件 马默思事件	3.01～2.92 3.15～3.05
吉尔伯特反极性时 (Gibert)	4.50～3.40	科奇蒂事件 努尼瓦克事件	3.92～3.70 4.25～4.05

注：资料引自，夏正楷：第四纪环境学，北京大学出版社，1997。

在第四纪期间，地球上各处冰期的开始时间和地磁极性倒转存在对应关系：北美内布拉斯加冰期开始时间与奥尔都维事件开始时间一致（2.14Ma）；

北美伊利诺冰期开始时间和布容正极性时的一次短极性事件（0.42Ma）对应；

冰岛的冰碛层出现在马默斯事件底部（3.06Ma），凯纳事件底部（2.90Ma）和顶部（2.80Ma），都是在地磁极性的倒转面上。

近年在北欧的地磁研究发现哥德堡极性倒转（1.375～1.240 万年），在北美也发现与哥德堡极性倒转同期的地磁极性突跳（1.24～1.235 万年），这一极性倒转事件与第四纪全新世全球气候变暖同时发生。

除了地磁极性的改变会引起气候变化外，近年来在几十年尺度内对磁场强度变化和年平均气温之间有一定关系，即地磁场增强时平均气温降低。图 5－4 给出苏格兰中部 1900～1970 年年平均气温和附近两个测点记录的磁场强度数值，从图 5－4 可见，磁场强度增强时，平均气温降低。

但对日本的琵琶湖湖底沉积的研究结果与苏格兰中部的研究结果相反：在地磁强度增强时气候变暖（某些适宜在较高水温条件下的介形虫数目增加）。

对于地磁场极性倒转和强度变化引起气候变化的原因，目前有不同的解释，最简单的一种是认为，在地磁极性转变时期，在约 1 万年的时间内，地磁场强度降低到原来强度的 1/4，导致地磁场对太阳辐射屏蔽作用减弱，使地表接受到的太阳辐射，从而引起大气环流的改变和气候的变化。

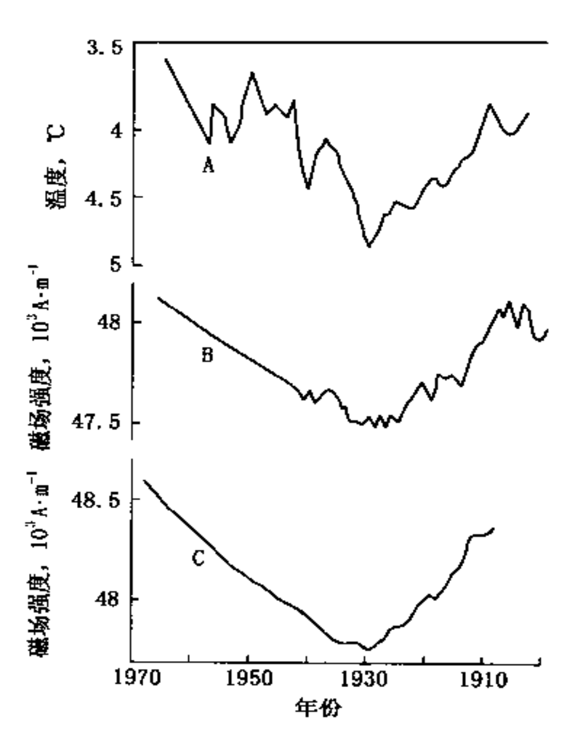


图 5－4　1900～1970 年苏格兰中部地磁场强度与气温对比（据 Wollin，1974）
A—英格兰中部温度变化曲线；B—斯托尼赫斯特磁场强度变化曲线；C—埃斯克伐尔米尔磁场强度变化曲线

除了地磁极性变化会引起气候变化外，还有研究认为，地磁极性的改变与生物物种的繁衍和灭绝之间有一定的统计关系，其机理除了气候条件的影响外还可能与前文所述的性别失调有关。古地磁学规定在 1 千万年（10Ma）年地磁倒转的次数为古地磁极性倒转指数，记为 N。某地质时代生物灭绝的科数与同时代生物总科数之比叫做生物灭绝指数，记为 B。克雷（Crain，1971）认为，古地磁倒转指数 N 和生物灭绝指数 B 间有相当好的对应关系（相关系数达 0.912）（图 5－5）。

除了上述研究结果外，海斯（Hays，1971）分析了全球 28 个深海钻孔中放射性虫的演化史，发现在 2.5Ma 以来的 10 次古地磁极性倒转中，有 4 次伴随有某些种属放射虫的灭绝，在灭绝的 8 个种中，有 6 个种的灭绝发生在反向古地磁极性的结束期。

刘东生（1986）研究了发生在第四纪中更新世发生的古地磁极性倒转的布莱克事件（0.117～0.104Ma，倒转过程持续约 15000 年）和发生在第四纪晚更新世的哥德堡事件（1.375～1.240 万年倒转持续过程约 1000 年）与生物演化的关系后提出，极性倒转过程短的哥德堡事件比极性倒转过程长的布莱克事件对生物演化的影响要大得多，哥德堡事件造成晚更新世末到全新世初（1.4～1.1 万年）生物大量灭绝。据此认为，突然出现的地磁极性倒转容易造成生物物种的灭绝。

由于地磁极性倒转对生物灭绝的过程难以用实验再现，而且地磁变化对生物灭绝的机理

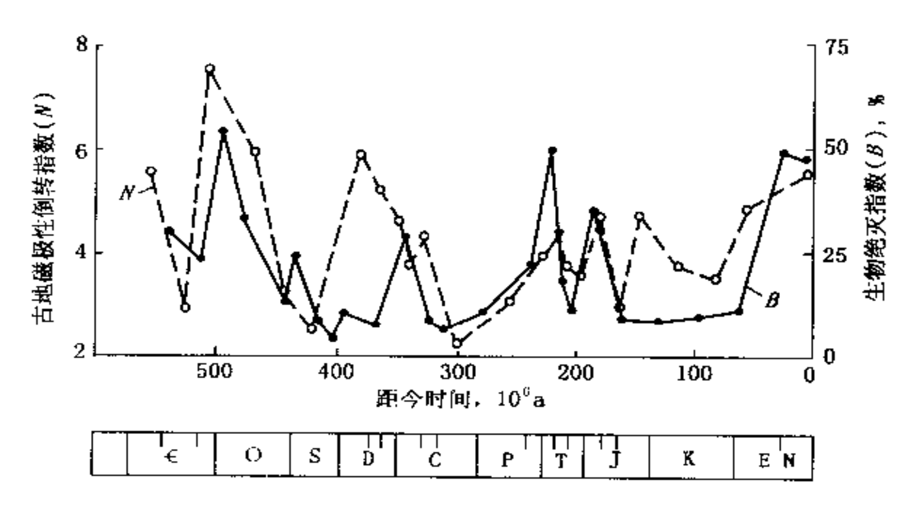


图 5－5　古地磁极性倒转指数 N 和生物灭绝指数 B 间的关系

（据 Crain，1974）

虚线—古地磁极性倒转指数；实线—生物绝灭指数

难以论证，因此也有人持不同观点。例如。普洛特尼克（Plotnik，1980）用概率方法对已经发表的生物化石灭绝和地磁极性倒转之间的关系后认为，生物灭绝和地磁极性倒转间未见明显关系。

第三节　磁学方法在环境问题中的应用

地球上绝大多数的磁性物质来自地球本身，地球上发生的地质运动过程、气候变化、生物演化、人类活动都可能造成磁性物质的迁移、分布和性态的改变，也就是环境会对地球整体或局部的地磁场分布和特征产生影响。反过来地磁场的分布和变化也是地球上物理环境的一部分，因此也可能对人类生存和发展的生态环境产生影响。以下对这方面的某些研究成果和方向予以说明。

一、环境磁学中测量的磁性参数

地球上物体的磁场可以看成两部分，一部分是宏观的、地球本身的地磁场，通常可通过对地磁三要素（垂直分量、水平分量、磁偏角或 x、y、z 三个方向的分量）的测量来研究。另一部分是，局部环境、矿体、物质的磁场，对这一类局部的问题，主要是研究和了解观测对象中磁性矿物的种类、数量和分布特征。地球上的各种局部研究对象的磁性主要是受所含铁磁性物质的含量和分布来决定的。而对这些研究对象的磁性的描述通常用下列参数：

磁化率。前文已经述及，磁化率是表示物质在磁场作用下获得的磁化强度大小的物理量，通常与物质（矿体等）中铁磁性物质的性质、含量、分布有关，在环境磁学中用以描述物质磁性的参数有：容积磁化率 k，表示单位体积物质中在磁场作用下获得的磁化强度的大小；质量磁化率 χ，表示单位质量物质在磁场作用下获得的磁化强度大小。

剩磁。铁磁性物质在外加磁场取消后由于各种不同物理条件而产生残存的磁感应密度，即在各种不同温度下（均低于居里点）获得的等温剩磁（IRM）；在常温条件下由恒定磁场作用获得无滞剩磁（ARM）；岩石样品能获得的最大剩磁，叫做饱和等温剩磁（SIRM），通常是在 1T 的强磁场中磁化后获得的剩磁；样品在 20mT 的弱磁场中获得的剩磁叫做软剩磁

(IRMs)，这一参数反映样品中亚磁性矿物的含量；样品在 300mT 的较强磁场中获得的剩磁叫做硬剩磁（IRMh）。

矫顽力（B）。即为消除剩余磁化强度需要加的反向磁场强度的大小。

环境磁学中还习惯用低频磁化率（χ_{lf}）与高频磁化率 χ_{hf}的相对差值。

$\chi_{lf}-\chi_{hf}/\chi_{lf}$作为衡量样品中细晶粒磁性矿物多少的指标，称为磁化率频率系数，记为χ_{fd}。

上述参数容易测定，而且反映物质的磁性特征直观。有研究认为，磁化率可作为化学元素含量分析的替代指标。例如对伦敦郊区高速公路两侧尘埃和沉降物样品的研究表明，样品的磁化率和其中所含铜、铁、铅、锌有明显关系。

二、磁学方法在研究某些环境问题中的应用

1．查明铁磁性物体和废弃弹药

勘探地球物理中的磁法勘探是对某个区域的地磁场强度进行调查，然后根据磁异常圈定异常体的范围，并解释评价引起磁异常的地质或地球物理原因。磁法勘探可以根据沉积岩和岩浆岩、变质岩在磁性上的差异划分出各种不同成因的岩石的分布范围，查明控制成矿的断裂该厂构造。磁法勘探还能查明某些与磁性有关的矿产资源。例如，原苏联在 20 世纪 50 年代勘探开发的库尔斯克铁矿就是通过航空磁测发现的，磁法勘探测量地磁场的强度，或者测量地磁场的梯度，从而消除地磁场背景值的影响，突出磁异常体对测量结果的贡献。因此用磁法探测某些磁性物体，如查明城市中的输气、输油和输水管道的位置，在公路、铁路、航空港、码头施工过程中查明地下管线的位置，查明废弃弹药的埋藏位置是磁法勘探在环境问题中最直接的延续。20 世纪 90 年代末，北京颐和园昆明湖清淤工程过程中用磁力梯度测量查明了数百发废弃的炮弹；江苏省的文物部门用磁力梯度测量方法在长江口 3m 深的淤泥中找到一门重 1.5t 的清朝古炮（炮名“扬威大将军”）。在机场、港口和车站都可用磁法测量检查武器和金属类危险品（刀具等）。

由于环境问题所检测的物体与地质勘探对象相比，尺寸小，埋藏浅，因此所测量的参数，往往是磁性的测量比磁场的测量更重要（例如，机场对武器和刀具的磁检）。

2．城市和工业废弃物污染的监测

已有资料表明，对来自大城市、工业区、海港的大气粉尘、气溶胶样品的磁性测定证明，这些样品的磁化率、剩磁都比在其他地点采集的样品高 10 倍以上。这说明工业排放的废气中，往往有强磁性的微粒，因此污染物的磁化率可从总体上反映采样区域的污染程度。前已述及，伦敦郊区高速公路两侧降尘的磁化率与尘埃中铜、铁、铅、锌等重金属污染物的含量相关。另外，燃煤产生的粉煤灰，其中含强铁磁性矿物 Fe_3O_4，虽然含量仅为 10ppm 数量级（48.44μg/g 左右），但其磁化率可达 2777×10^{-8}SI（国际单位），是黄土、黏土、湖底沉积物的几十倍。我国兰州附近，地表黄土层有较高的磁化率值，是由于 50 年以来工业废气、废水和固体废弃物中重金属污染所致。在某些不受水流影响的沉积物中，磁性异常往往是大气降尘所致。因此若能同时测定这些沉积物的年代，即可根据沉积物磁性的变化评价大气污染的变化历程。在北美和斯堪的纳维亚半岛酸雨研究项目中，将高地湖泊沉积物（不是受工业排放的废水所产生，而只是受降尘和降雨影响）磁性的差异作为评价受工业化程度影响的指标，并据此分析工业发展使大气污染物增加的历史过程。

另外，来源不同的大气污染物，其磁性有差异。例如火山灰和森林火灾的灰尘与大风扬起的沙尘的磁性是不同的。因此根据沉积物中磁化率的测量可以区分污染物的来源，在同一

来源的污染区（例如火山灰沉降区）还可以根据对火山灰的磁化率测量了解火山喷发的次数和历程。同理也可对在森林火灾下风区的沉积物进行磁化率测量，以了解森林火灾的次数和历程。

城市下水道或工厂排污管的污水往往通过河流排放，在污水中往往有金属碎屑或其他铁磁性污染物。特定的污染源排放的污染物在其磁化率上有其特有的特征，例如，电镀厂废水的磁化率和印染厂的废水的磁化率不同。因此可以根据污水的磁化率的差异查明污染来源，评价污染河段。特别是查明特殊的污染源（如电池厂的含锰废水）和污染区域。在海洋中，对海底表层沉积物磁化率的测定和研究，可鉴别污染区域，并可对不同河流对海底污染负荷比例做出评估。

上述的对大气降尘堆积物和河流、湖泊、海底沉积物磁性研究及其应用，在本质上是磁性物质来源的追溯。按照这种思路，可以在古地层研究和古沉积环境研究、古地理和古气候变化分析、考古等方面进行工作。

城市生活垃圾中往往有一定数量的磁性物质，在德国的汉诺威，曾在一个生活垃圾场上空进行过航空磁测（同时还进行了航空电磁测量和航空放射性测量）。测量在直升机上进行，测线距离 50m，平均飞行高度 50m，悬挂在机外的磁探头踞地面高度 30m。测量结果表明，从垃圾场的南侧向北，磁异常的幅度从 750nT 降低为 560nT，与垃圾场外的背景值相比，异常值明显，磁异常区域与垃圾堆放区域重合，说明磁异常是由垃圾堆中的铁磁性物质引起的。

3. 土壤磁学研究

土壤是人类不可缺少的自然资源，土壤也是环境要素之一。土壤能提供植物生长需要的水分和养料，另外还能使进入土壤的污染物，或分解，或被吸收，最后被同化为土壤的一部分。土壤有其生物的、化学的、物理的特性。其中对土壤磁学性质的研究在土壤的生成和来源、土壤的发展和演化与古地理、古气候的关系方面有某些特殊的作用。

土壤的磁性来源于土壤在中的磁性物质，土壤中的磁性物质一部分是来源土壤的母岩（内源性的），另一部分来源于大气降尘和水流沉积。

在各类岩石中，火山喷发岩的磁化率最高，为 100～1000；侵入岩其次，约 100～1000；变质岩的磁化率约 100；沉积岩的磁化率最低，仅为 10，即是火山岩的 1/10～1/100。由于土壤的母岩来源不同，其磁性差别明显。

表 5-9　我国部分地区红壤和栗钙土的磁化率

地区和土壤、沉积物	昆明，玄武岩红壤	杭州，页岩红壤	四明山，安山岩红壤	河北，玄武岩栗钙土	黄土高原，栗钙土
磁化率（χ）	1490～6180	40～50	518～807	400	36

从表 5-9 可见，岩浆岩（喷出岩和侵入岩体）成因的土壤（玄武岩、安山岩）的磁化率较高，而沉积岩成因的土壤磁化率较低。

同一种土壤，由于其含水率不同，其磁性也有差异。原因是，土壤在水渍条件下，往往表现为还原环境，含水的磁性矿物呈现弱磁性。在土壤水分缺少，或经过高温、灼烧，变成氧化环境，原来含水的磁性矿物（含水氧化铁等）变成无水的磁铁矿（Fe_3O_4）一类矿物，其磁性明显提高。

土壤中的有机物也与土壤的磁性有关，尤其是土壤中的胡敏酸类有机酸，是土壤中磁性矿物生成的接触剂。因此，富含腐殖质的土壤的磁性较高。

对我国黄河中游的面积达 27.5 万 km^2、厚达 300m 的黄土高原的黄土成因，以往有过风成和水成的争论。1989 年，刘东生等根据对黄土层磁结构的研究，根据其磁化率较低等特点，论证了大面积黄土是风成沉积物。

4. 地震预测和地磁变化

地震前岩层由于应力发生改变，因而岩层中磁性矿物的磁畴排列也发生改变，因此发生磁异常。1970 年 1 月 5 日，我国云南省通海地区发生 7.7 级地震。震前，地磁异常明显，甚至干扰半导体收音机的收听效果。因此地磁异常往往被认为是地震的前兆现象。但地磁异常是在地磁场背景值上的较弱信号，因此排除干扰提取与地震有关的地磁信号是个极为困难的问题。另外也观察到与上述机理不同的周期较短、幅度较大的地磁异常，这些异常的机理和地震的孕震机制和发震机理都有待进一步研究。

小　结

磁场广泛存在于自然界和生物体内，地球的磁场包括基本磁场和变化磁场两部分。岩石的磁性主要由岩石所含铁磁性矿物而来。地磁场作为一种大的物理环境，对人类生存和发展的生态环境产生影响。如引起人类活动或行为的异常，和某些疾病和全球气候都有一定的联系。目前，磁学方法在环境问题方面的应用主要是查明铁磁性物体和废弃弹药、城市和工业废弃物污染的监测、土壤磁学研究和地震预测和地磁变化等方面。磁场对生物和生命过程影响，磁场在环境方面的应用等都还有待于进一步研究。

思考题

(1) 人类在利用磁场方面已经取得哪些成果?

(2) 人类目前对磁场的认识还存在哪些不足?

第六章　环境地球物理学中的电学问题

本章要讨论的内容包括两方面，第一，大气、海水和地球内部（岩石圈及地幔）等环境介质的主要电学性质及在这些介质中电物理过程和特征；第二，电学方法在环境污染调查和生态环境保护方面的应用。

第一节　大气的电学性质及大气层中的电物理现象

大气作为一种介质的电学性质，首先是大气的电导率。大气的电导率取决于大气中导电离子的种类和数目。另外还应讨论大气层中的电荷产生和流动过程以及相应的物理现象——闪电、雷暴等。

一、大气中的导电离子和电导率

1. 大气中的导电离子

大气中的导电离子分为小（轻）离子和大（重）离子两类。通常小离子是几个中性分子聚集在一个导电离子周围而形成的粒子，其半径约 $10^{-8} \sim 10^{-9}$cm，在单位电场（V/cm）作用下的平均运动速度（cm/s），即离子迁移率为 $1.5 cm \cdot s^{-1} /(V/cm) = 1.5 cm^2/(V \cdot s)$。小离子附着到大得多的中性气溶胶粒子上可形成大离子，由于其半径比小离子大 1～3 个数量级，因此其迁移率仅有 $10^{-4} \sim 10^{-2} cm^2/(V \cdot s)$。在大气层中有这些离子存在，大气（特别是低层大气）有微弱的导电性。

大气中的导电离子主要是地球岩石圈和大气层中的放射性物质以及宇宙线的作用而产生的。大气层中邻近地表的最低层大气，由于地壳中放射性物质的作用，约以 8 对/$(cm^3 \cdot s)$ 的速率产生导电离子（称为离化率）。随距地面高度增加，宇宙线在大气层中产生导电离子的作用明显。尤其是在海洋上空，宇宙线对大气层中导电离子的产生起主要作用。在地球的中纬度地区，在距地面 12km 处，离化率达极大值：45 对/$(cm^3 \cdot s)$。随距地面高度增加，大气密度降低，离化率也急剧下降。

大气层中导电离子的数目受多种因素制约，主要制约因素是：离化率的大小，大小离子间的复合作用，大气中的平流和湍流对导电离子的输运、扩散作用和大气层中电场的电磁力作用。近年来，还发现地面和高空的人类排放物也对大气层中的离子数目产生影响。平均而论，大气层中正离子的数目略多于负离子的数目，因此与带负电的地面相比，大气层是带正电的。在海洋上空，小离子的浓度约 $700/cm^3$，大离子的浓度约 $200/cm^3$；在乡村上空，小离子的浓度约 $600/cm^3$，大离子的浓度约 $2000/cm^3$；在城市上空，小离子浓度约 $100/cm^3$，大离子浓度约 $2000/cm^3$。即在人类排放物产生的气溶胶越多的地方，大气层中的导电大离子的数目越多。

2. 大气层的电导率

大气层的电导率与大气层中导电离子的浓度及离子的迁移率成正比，由于小离子的迁移率远大于大离子的迁移率，因此大气层的电导率主要取决于小离子的浓度。

电性相同的离子产生的电导率称为极性电导率。由于大气层中正离子的浓度大于负离子

的浓度，因此大气层中正极性电导率略大于负极性电导率。在海平面上大气层的电导率 σ 约为 2×10^{-14}S/m（电导率 σ 的单位为 S/m，中文为西门子/米，1 西门子 = 1 安培/1 伏特 = 1/欧姆；或 1S = 1A/1V = 1/Ω，电导率 σ 和电阻率 ρ 的关系为 $\sigma=1/\rho$，因此大气的电阻率 ρ 约为 $5\times10^{13}\Omega\cdot m$）。

二、大气层中的电场

由于地球表面带负电荷而大气层带正电荷，因此在大气层中存在电场，这种电场称为大气电场，其方向是垂直指向地面。大气电场可分为晴天电场和扰动天气电场两类。

1. 晴天电场

晴天电场是正常状态下的电场，并作为天气变化时，大气电场变化的基准或参考值。晴天电场的方向是垂直指向地面，由于晴天电场的水平方向分量可忽略不计，因此晴天电场沿海拔高度的变化称为大气电位梯度（晴天电场强度）。就全球平均状况，在陆地上空晴天电场强度为 120V/m，在海洋上空为 130V/m。在工业区和人类居住区上空，由于大气中存在较多的气溶胶，其上空的晴天电场强度可达几百 V/m。晴天电场在空间的变化是随纬度增加而变大，这称为晴天电场的纬度效应。在地表和电离层两个“导电层”（相对于电导率不高的大气层而言）之间的大气层中的晴天电场，其强度在地表附近最大，随海拔高度增加按指数规律减小，在对流层中晴天电场强度 E（单位：V/m）随高度 h（单位：km）变化的规律为：

$$E(h)=90e^{-354h}+40e^{-0.23h}$$

除了随空间的变化以外，晴天电场还有随时间的变化，即以日和年为周期的变化。其中，主要是以日为周期的变化。在海洋和两极地区，晴天电场的日变化和地方时无关，只是在世界时（格林尼治平太阳时）的 19 时出现极大值，而在世界时的 04 时出现极小值，极大和极小值的变化幅度约是平均值的 20%。在陆地上空晴天电场的日变化与地方时有关，即在地方时的 04～06 时和 12～16 时出现极小值；在 07～10 时和 19～21 时出现极大值，极大和极小值的变化幅度约是平均值的 50%。这种变化与接近地面的大气层中气溶胶粒子数目的日变化规律密切相关。晴天电场以年为周期的变化在海洋上空不明显，在南北半球的陆地上空，在冬季晴天电场出现极大值，而在夏季出现极小值。还有观测发现晴天电场有 27d 和 11 年的变化周期，这些现象或规律都有待进一步研究。

2. 扰动天气电场

当出现激烈的天气现象如雷暴、雪暴、沙尘暴时，大气电场的方向和强度都有明显而不规则的变化。在各种不同的云层中，如层状云和积状云以及雷雨云中，由于云中导电的云滴（水滴）和冰晶的运动过程和规律不同，所产生的电场的方向和强度都不相同，尤其是在地表以上 3～6km 处产生的雷雨云中，电场强度平均为（2～4）$\times10^4$V/m，强的起电过程甚至可达 4×10^5V/m，比作为参考的晴天电场要大 2～3 个数量级。扰动天气在对流层中产生，雷雨云对扰动天气的电场作用最明显。根据观测，雷雨云中的扰动天气电场有以下特征：强烈的大气对流和降水是产生扰动天气电场的重要条件；单个雷暴和降水活动时间约 30～40min；云层厚度至少 3～4km 才能产生强起电和闪电；云层中有冰晶存在时，由于冰的热电效应（冰块上温度不同的区域，有不同符号的电荷存在，在温度较高的区域出现负电荷，而在温度较低的区域出现正电荷），往往有强起电过程；雷雨云中电荷密度大于 $4\times10^{-8}C/m^3$（库仑/米^3），每个雷雨云中，闪电发生频率约为每分钟数次，每次与地面接触的闪电平均向地面电输送约 20C（C：库仑，1 库仑为 6.24×10^{18}个电子的电荷）的负电荷，

全球平均每秒发生约100次闪电，其中约有20次为接地的闪电，据此估算，闪电放电向地面输送的电流强度约20次×20C/s=400A。

三、全球大气的电平衡

地球的固体部分带负电荷，其平均电量约-5×10^5C，这是地球的固体部分和大气层之间各种电流输送过程达到平衡的结果。地球的固体部分和大气层的电流输送过程包括：地空电流、接地闪电、降水电流、尖端放电。

1. 地空电流

在方向为从空中垂直指向地面的大气电场作用下，大气层中的正离子向地面运动，地面的负离子向大气层运动所产生的电流即为地空电流。

在晴天电场作用下的晴天地空电流密度J几乎不随高度变化。按微分形式的欧姆定律，大气层中的传导电流密度：

$$J=\sigma E$$

式中　σ——大气层的电导率；

E——大气层中的电场强度。

在电流密度J稳定的条件下，大气层中的电场强度E和电导率σ是成反比的，即在大气中导电离子数目多的区域（电导率高），如有人类活动的陆地上空，其电场强度低；而在导电离子数目少的区域（电导率低），如人类活动较少的海洋上空，其电场强度高。在大气层中，晴天地空电流密度J约为（2～4）$\times10^{-16}$A/cm²，据此推算出全球的总地空电流强度约为1800A。

晴天地空电流也有空间和时间的变化。陆地上晴天地空电流在冬季为极小值，而在夏季为极大值。在海洋上空，冬季和夏季晴天地空电流的变化微小。对地空电流的这种变化，目前还没有满意的解释。

晴天地空电流的变化还和太阳活动有关。在美国夏威夷州冒纳罗亚高山观象台的观测结果认为，在28次太阳耀斑爆发后，地空电流比正常参考值大11.7%，而且观测到的地空电流的增大80%发生在太阳耀斑爆发后的24h以内，这说明太阳活动对晴天地空电流有明显影响。

2. 闪电放电

前已述及，全球每秒钟约发生约100次闪电，其中约有20次发生在地表附近，通过接地向地表输送负电荷，每次接地的闪电向地表输送的负电荷约20C，按此计算闪电放电每秒钟向地表输送20×20C负电荷，即闪电放电的电流强度为400A（A：安培，1安培＝1库仑/秒，1A＝1C/s）。

3. 降水电流

通过雨、雪、霜、雾等降水过程也可能产生电流并向地面输送电荷。由于各种降水过程的强弱不同，因此向地面输送的电荷量差异极大，甚至向地面输送的电荷的符号也不尽相同。总体来说，降水向地面输送正电荷为主（因为大气层中正电荷数目多于负电荷；而且雷雨云放电时产生的正离子大量被降水粒子捕获并降至地面）。在各种降水过程中，雷雨向地面输送的电量最大。全球因雷雨等降水过程产生的电流总量约600A。

4. 尖端放电

在雷雨云临近时，在树木、青草和建筑物的尖端附近，由于物体的曲率大、电力线密集，电位梯度（电场强度）增大而使其附近的部分气体被电场击穿而发生放电，这就是地球

上普遍存在的尖端放电现象。对于地面附近的尖端放电，其电流强度为：

$$I = a(U - V_o)(v^2 + W^2)^{1/2}$$

式中　U——尖端附近空气中的电位差；

a——与尖端形状、高度、环境电学特征有关的常数，在国际单位制（SI）中，$a = 1.4 \times 10^{-11}$F/m；

V_o——尖端放电的起晕电压，与放电尖端的环境有关，约几千伏（V），在放电电流很大时，V_o 可忽略；

W——风速；

v——离子运动速度（v 等于离子迁移率与电场强度的乘积）。

1970 年在尼日利亚进行过两年的观测，对树木、青草和不同高度的金属尖端的放电过程进行对比测量，其结果说明在面积为 50km^2 的雷雨云下面，能维持 0.6A 左右的尖端放电电流。据推算，全球尖端放电电流总量约 2000A，是向地面输送电荷最多的天气过程。虽然从大气层只向地面输送的电荷以正电荷为主，但尖端放电向地面输送的电荷主要是负电荷，正负电荷之比约为 1.5～2.9。

以上四种电荷流动过程维持大气层中的电平衡，但对以上四种过程所输送的电量和电流强度的估计还是初步的。另外上述四种维持大气层中电平衡的电流强度虽然有约四千多安培，但由于电流密度低，在通常情况下并不对人类活动有明显影响，或人类已经适应在这样的环境中生存。

四、大气层中的电物理过程

1. 闪电和雷暴

在安阳出土的殷墟甲骨文中就有早在公元前 14 世纪关于闪电和雷暴的记载。大约在周朝成书的《周易》用乾、坤、震、巽（音迅，xun）、坎、离、艮、兑等“八卦”表示天、地、雷、风、水、火、山、泽。“八卦”的概念已经有在自然界中存在天和地，雷和风，水和火，山和泽等四种对立现象和矛盾的意识，而且认为雷是风（气流）的一种对立形态。在西汉时期淮南王刘安编撰的《淮南子》中提出，宇宙万物由“阴阳二气”构成，并提出“阴阳相薄（接近）为雷，激扬为电”的设想。东汉的王充（约公元 27～97）在《论衡》的“雷虚”篇中认为：“雷者，太阳之激气也。何以明之？正月阳动，故正月始雷，五月阳胜，故五月雷迅，秋冬阳衰，故秋冬雷潜”。这是对雷电现象和季节特征关系最早的文字描述。在西方，德谟克利特（约公元前 460～370 年）最早提出雷和闪电是同时发生的，只是因为看到的比听到的快，才被认为是分开的。从人类文明开始到 16 世纪，人类对气候和雷电现象是关注的，并积累了许多资料、提出了各种观念。但这些知识都是零碎、片断的，很多还是推测性的，直到 18 世纪才有了现代科学意义上的关于雷电的观测和研究。

1752 年 6 月，美国的 B·富兰克林在费城用风筝和引线对雷电云进行探测，证实了由雷电云通过风筝和引线传递的电荷（天电）和由地面上摩擦产生的电荷（地电）在本质上是相同的，都能产生电火花。富兰克林还据此发明了避雷针。同期俄国的 M·罗蒙诺索夫和 Г·里赫曼也用类似的方法进行了实验，用风筝将自制的雷电探测器升空到雷雨云下，将雷雨云中的电荷引到地面并观察到电荷产生的电火花，里赫曼还不幸被雷电击毙，成为这项研究的献身者。

根据 20 世纪 30～40 年代用尖端放电原理研制的雷雨云电场探空仪（G·C·辛普森）几十次的探测结果认为，雷雨云中电荷分布是一种电偶极子模式：雷雨云上部是中心高度为

6km、半径 2km、带正电（约 25C）的区域；下部为中心高度约 3km、半径为 1km 的带负电（约 20C）的区域；雷雨云底部还有一个中心高度 1.5km、半径 0.5km 的带正电的区域，雷雨云大体上是由上述三个云团组成的电偶极子结构。

按照现代科学的概念，大气层中的火花放电可分为云内放电、云际放电和云地放电三种，前两种称为云闪，后一种称为地闪，即接地放电。地闪在闪电总次数中约占 1/3～1/6（多数认为约占 1/5，即 20%）。由于地闪对人类生命和人类活动有威胁，因此对地闪的研究较为充分。

在云中曲折行进最后到达地面的闪电，人眼看去，似乎是一次瞬时闪光，但在高速摄影机下，则是通过同一通道的多次放电过程（这些放电过程在时间上间隔仅为百分之几秒）。整个闪电过程的每次放电，称为闪击，一次闪电可记录到多次闪击，甚至 10 次以上。闪击包括先导和回击两个过程。先导是为闪电放电建立电离通道的预备过程。先导分为梯级先导和直窜先导两种，梯级先导是像阶梯一样从雷雨云伸向地面电离发光过程。在梯级先导电离过程中，形成直径约 5m，每级长约 50m 导电通道，由于气体的电离过程，还产生发光，出现暗淡的光柱；先导的电离速度可达 10^5m/s，在通过约 50m 后，间歇 30～100μs，然后再继续向地面延续，整个先导过程以 1.4×10^5m/s 的速度向地面延伸并建立电离通道。当先导建立的电离通道距地面 5～50m 时，地面上的某个高点（尖端）将产生沿电离通道上行的回击过程，回击的速度约 5×10^7m/s，持续时间约 40μs，瞬时电流 10^4A（甚至可达 10^5A）。在梯级先导和第一次回击后，约有百分之几秒的间歇，然后是第二次先导和回击，在第二次先导和回击后的各次先导，不再按梯级方式进行，而是从雷雨云沿已经建立的电离通道直窜而下，称为直窜先导。由于直窜先导没有梯级，所以其速度要比梯级先导快 10 倍。产生回击时，沿地面向上形成的电离通道直径仅几个厘米，回击时产生光要比先导过程强得多，人眼所见的闪电即是回击时放电产生的光。一次闪电（包括多个先导——回击过程）持续时间约 0.2s，约向地面输送几十库仑的电荷。

由于闪电是非稳态过程，因此有人提出，在雷雨云的强电场附近由于电子碰撞的连锁反应使电子数目剧增时（所谓“电子雪崩”），将产生光子发射，由于光子发射产生新的衍生的电子雪崩，从而加速了电离过程，并产生光（称为“流光”），这就是闪电生成的流光理论的要点。

雷暴是由对流旺盛的积雨云引起的、伴有闪电雷鸣和强阵雨的局部地区风暴。雷暴过境时，瞬时风速可达 15～25m/s，风速极大值甚至可达 40m/s。雷暴通常伴随强降水过程，还可能同时发生冰雹、龙卷风、雷击等严重灾害。

2. 闪电时的电场变化

在距闪电发生处为 r 的区域内，由于闪电产生的电场包括静电场、感应电场和辐射电场三部分。

如果将雷雨云看成为电偶极子，即雷雨云由带正电的上部、带负电的下部和带正电的底部组成的偶极子结构，则在距离闪电发生处为 r 的区域内，静电场的强度与放电偶极子的电偶极矩（即偶极子所带电量与带正、负电的云团中心的距离的乘积）成正比，与 r^3 成反比。感应电场的大小则与放电电流成正比，与 r^2 成反比。辐射电场的大小与放电时电荷运动的加速度成正比，与 r 成反比。

对闪电发射光谱的研究能提供研究闪电物理性质的线索，对波长为 3000～10000Å 闪电光谱的观测，已经发现了 200 多条谱线，多数属于中性和电离的氮（N）和氧（O）的发射

谱线。对闪电光谱的研究还证明在闪电的电离通道内在几个微秒的时间内，温度达到25000～35000K的峰值，但很快，在约30μs时，温度降低到峰值的一半。在达到峰值温度时，电离通道内电子的浓度约（10^7～10^9）个/cm^3，约大于或等于电离通道内分子、原子和离子浓度之和；通道内的压强约1MPa。闪电时，电流强度上升率约为10kA/μs，在10μs左右放电电流达到峰值（10～100）kA。在发生地闪时，云地电位差约10^7～10^8V。一次闪电输送约20C的电量，所产生的能量约2×（10^8～10^9）J（焦耳）。由于强度为（10～100）kA的放电电流瞬时在几个厘米的通道内通过，产生激震波，在传播一定距离后退化为声波，即人听到的雷声。

3. 大气层放电过程中的电磁辐射（天电）

大气层中的各种放电过程还要引起强度、时间和频段不等的电磁辐射。这些过程主要是闪电、雪暴、尘暴和电晕放电。另外，人类活动也会产生强放电过程，其中最重要的是核爆炸诱发的大气放电。大气层中各种放电过程引起的电磁辐射称为“天电”。天电的特性由放电电源的特征和不同频段电磁波在大气层中的传播特性决定；通常用瞬变电磁场的波形或振幅谱来描述。在各种放电过程中，闪电的电磁辐射是研究得最充分的。

一次闪电在近程（几十千米）范围内产生电磁辐射（天电），在不同的频段有不同的特征。图6－1给出在极低频的1～100Hz频段、1～100kHz的甚低频和低频段以及在1～100MHz频段的典型电磁辐射图形。

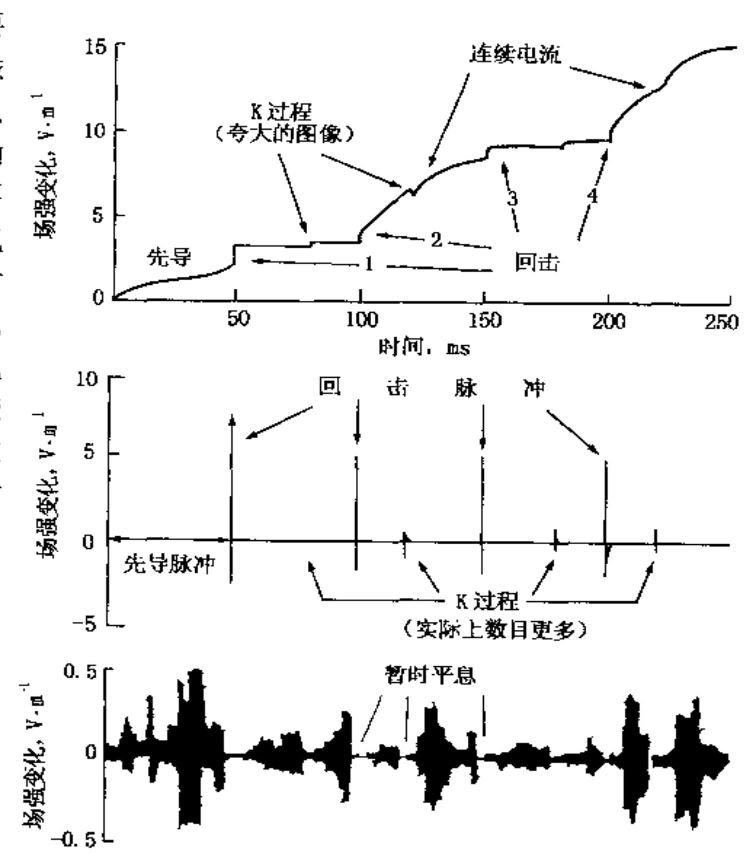


图6－1 闪电在近程区产生的瞬变电磁场的典型图例
（a）1～1000Hz；（b）1～100kHz；（c）1～100MHz

在图6－1（a）的1～1000Hz的极低频段，电磁辐射呈一系列阶跃，变化大的阶跃点对应于闪电中的回击过程；变化小的阶跃则对应于先导过程中遇到异性电荷集中区产生的反冲电流的过程，其物理机制与回击相似，但所产生的电流强度比回击的电流强度低约1个数量级。气象学中将这一过程称为K过程。在回击和K过程产生的阶跃之间的电场强度缓慢变化部分对应于回击后的恢复性的连续电流，持续时间几十毫秒，电流强度为几百安培。

在图6－1（b）的（1～100）kHz甚低频和低频段，电磁辐射表现为在先导段的密集脉冲和在回击和K过程的极强的分立脉冲。

在6－1（c）的（1～100）MHz频段，电磁辐射表现为密集脉冲，只是在回击和K过

程后略有间隙。

闪电的电磁辐射平均振幅谱如图 6－2。振幅的峰值出现在 5kHz 附近，在频率高于此的频段，谱振幅大致与频率成反比。根据图 6－1 和图 6－2 可以判断，在 1～1000Hz 的极低频段，电磁辐射主要由先导过程的连续电流所产生；在 1～100kHz 的甚低和极低频段，电磁辐射主要由回击和 K 过程引起；1MHz 以上的电磁辐射则主要是由先导过程产生。高频以上电磁辐射产生的机制则还要进一步研究。

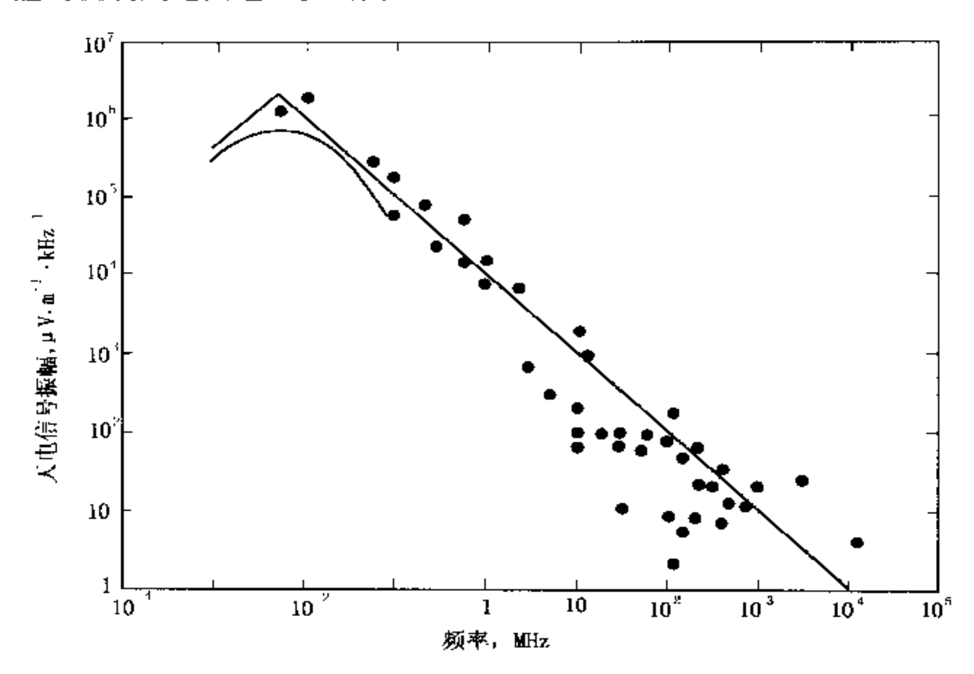


图 6－2　距离闪电 10km 处的电磁辐射平均振幅谱，
曲线表示回击产生的电磁辐射平均振幅

还要说明的是，由于闪电次数的频繁和统计记录的闪电样本数目有限，因此图 6－2 所示的平均振幅谱和任何一个闪电的电磁辐射振幅谱都可能有明显差异，图 6－2 只是趋势性的结果。

闪电产生的各种频段的电磁辐射在大气中的传播特性是不同的。在频率为 1000Hz 以下的极低频段和（1～100）kHz 的甚低频和低频段，地面和电离层起波导作用，因此频率为 1000Hz 以下的极低频和频率为 3～30kHz 的甚低频和低频段能传播很长距离，但是这两种不同频率的电磁辐射的传播速度的衰减都不相同，在传播一定距离后出现时差，即离闪电发生处越远，低频和极低频电磁波到达的时差越大。另外由于不同频率的电磁波的衰减不同，因此，不同频率电磁波的振幅也不相同。可以根据在地面固定观测点上记录到的不同频率电磁波（低频段以下）的时差和振幅比值来确定雷电（闪电）发生的位置。闪电时产生的高频电磁波主要通过电离层的反射传播，甚高频以上的电磁波（频率为 30MHz 以上）则只能在视线距离内传播。

闪电以外的其他产生电磁辐射的天气现象，如雪暴、尘暴、电晕放电所产生的电磁辐射强度都很弱，频段也相当窄，通常只会对局部地区的通信产生某些干扰。

五、大气层中的放电过程对生态环境和人类活动影响

雷电是一种局部的自然灾害，在地球上分布范围广，从 N82°～S55°都有雷电灾害发生；雷电发生频繁，全球每年发生 31.5 亿次，平均每秒钟发生 100 次。由于在极短时间内发出极强的电流，在极狭小的放电通道内，瞬时产生高温和冲击波，因此可能造成灾害。雷电成灾的立体性强，在地表附近、低空和高空都会产生危害。接地时会对附近的人、畜和建筑物（高层建筑和重要仓库）造成伤害，还可能破坏电力系统。在空中的雷电还会对航空器产生威胁，对无线电通信，对导弹的发射和控制也有影响。雷电灾害对航空器、导弹和人造卫星发射的影响，对电力系统的威胁和造成的损失的若干案例，在第三章中已有详细介绍，此处不再重复。

1. 雷电对人的伤害作用

雷电接地时，所产生的电流会对人有伤害作用。实验证明，多数人能忍受 1mA 电流；5mA 电流通过人体能使人感到疼痛；但对人体还不形成伤害；15mA 的电流能使肌肉和神经发生强直性收缩（“抽筋”）；60mA 的电流从上肢流向另一上肢通过心脏时会使心脏发生纤颤；100mA 电流通过人脑可使人立即失去知觉。

人体能忍受的电流的大小在颇大程度上取决于人体的电阻。人体组织的电阻主要取决于含水量、密度。血液、神经、肌肉是良导体，腱鞘是不良导体，骨骼和脂肪是最差的导体。皮肤基本上是不导电的，1cm^2 干燥的皮肤的电阻约 10 万 Ω，手掌和足跖的表皮层较厚，干燥时电阻约 200 万 Ω。皮肤的温度和清洁程度也影响其电阻，潮湿的皮肤比干燥的皮肤电阻小 1000 倍。因为皮肤的电阻值大，因此进入人体的电流强度主要与皮肤的电阻有关。闪电产生的电流首先通过皮肤，并在皮肤上转化为热能（雷电击伤时，局部温度可达 4000℃），严重时使皮肤凝固、炭化。炭化后的皮肤电阻减小，使电流容易进入人体内部，并首先流经导电的血管和神经，造成血管壁和神经坏死，血管内形成血栓。

在靠近雷电发生处，产生的激震波传播后退化为声波（雷声），其噪声级可达 150db，这足以使人产生剧烈的耳鸣、晕眩，甚至恶心、呕吐等症状。

2. 雷电对建筑物的损害

建筑物遭遇雷击的机制有直接雷击和感应雷击两类。直接雷击是雷雨云很低，周围也没有异性电荷的雷雨云时，这种雷雨云就会在地面突出物（多为建筑物）上感应出异性电荷，产生放电。这种雷击直接袭击建筑物，可使建筑物毁坏或起火。感应雷击则是由于雷雨云的静电感应或放电时的电磁感应作用，使地面的金属物件产生感应电荷造成的放电。感应雷击一般不直接损坏建筑物，对容易使易燃易爆物品起火或爆炸。

雷电对建筑物损害与建筑物的高度有关。高的建筑物越高受雷电袭击的概率越大。表 6－1是建筑物高度和受雷电袭击的概率。

表 6－1　建筑物高度与受雷击的概率

建筑物高度，m	360	300	240	180	90	<15
受雷击的概率，次/a	20	10	5	3	1	1/4～1/6

除了表 6－1 中的统计结果外，世界上几座著名的高楼也频频遭雷击：1931 年建成的、高 381m 的纽约帝国大厦平均每年遭雷击 23 次；高度为 537m 的莫斯科电视塔在 4 年半中遭雷击 143 次，平均每年 32 次。

对高层建筑物防止雷击的传统方法是安装避雷针。但要注意，避雷针的保护区域有限，对单支的避雷针，其保护角约45°，即以避雷针尖端为顶点的45°球心角内；在地面，保护区半径则是避雷针高度的1.5倍。1985年上海的龙华古寺遭雷击，弥勒殿的屋顶被削去一角，该建筑物装了避雷针，而且避雷针也没有锈蚀、断裂，性能完好，但仍然发生了雷击事故，究其原因，是弥勒殿宫殿式的屋顶不在避雷针的保护区内。

避雷针宜用镀锌圆钢或镀锌圆管制作，圆钢的直径应不小于12mm，钢管的内径则应大于20mm，引下线要用镀锌的圆钢或扁钢，其截面积应大于50mm^2，接地体要用角钢、圆钢或钢管制作，其长度一般为2.5m，埋地深度不小于0.5m。避雷针、引下线和接地体接点要接触良好，防止由于接点间接触不良而发生放电。避雷针安装后，每年在雷雨季节到来前要进行检查，保证避雷针到接地体之间的电阻值在规定的标准之内。另外，室内的供电线路应该与室外的避雷针的引下线保持一定距离，以免在其间由于感应发生放电。

3. 雷电对微电子器件的损害

以往雷电对人类活动和环境的影响，只注意到其“强电”的一面。进入20世纪后期以来微电子技术发展迅速，而现代的高科技产品大部分是以微电子器件为基础的。微电子器件体积小、能耗低、作用迅速灵敏，但微电子器件即使受到微弱的电磁作用时，就容易失效或损坏。在雷电放电过程中，由于电流强度的变化率极大，因此产生强烈的电磁感应，除产生瞬时高压外，还产生磁脉冲。当产生的磁脉冲的磁感应强度达0.07G（高斯，约为北京地区地磁感应强度—0.55G的1/8）时微电子器件将受到干扰；当磁脉冲的磁感应强度达2.4G时微电子集成电路将受到永久性损坏。因此，微波通信、航空器自动驾驶、导弹和火箭的飞行控制、室内的微机等都容易受到雷电过程中“弱电”（电磁辐射）的损害。1984年6月上旬某日，日本警视厅在进行有线制导的“马特”反坦克导弹实弹射击时，在距离靶点1.5km的空中时，因遇到雷雨云，导弹当即坠毁，同时在地下室内隐蔽的5名操作者也被导线引入的雷雨云电荷烧伤。在第三章中提到的1992年6月20日20时05分，在北京的中央气象局气象中心大楼遭雷击，建筑物和避雷针完好无损，仅计算机及局域网和国际、国内同步通讯线路受到破坏，就是“弱电”损害微电子高技术设备的典型事例。

现代化的高层建筑物中往往有许多采用微电子器件的高技术网络：电话线网络、微机网络、输电线网络、有线电视网络、安全防范网络、电梯运行网络、大楼自动管理网络。为了改进避雷针只能防止雷击的“强电”损害，现代的高层建筑物往往采用笼式避雷网，即利用大楼外墙内的钢筋网来引雷入地，除了可将雷击时的“强电”引入地外，还可以作为金属屏蔽网，削弱雷电时产生的电磁脉冲对微电子器件的影响和破坏。

4. 雷电造成的其他生态环境破坏

雷击除了能造成人员伤亡、建筑物损害、航空器事故、微电子器件失效和损害等直接破坏外，还能引发其他生态环境破坏，其中最明显的是森林火灾。森林火灾是大气圈中的灾害诱发生物圈生态环境变化或灾害的最典型事例。据统计，美国森林火灾中70%以上是由雷击引起，每年因雷击发生约10000次火灾烧毁约160万hm^2（400万英亩）林木，损失约10亿美元。原苏联的森林火灾总次数中约1.57%是由雷击引起，个别年份雷击引起的火灾的比例还要高。我国大兴安岭林区每年平均发生两起由雷电引起的火灾；1974年7月3日在新疆阿勒泰地区的哈熊沟发生雷击火灾，烧毁森林10万亩、草场3.5万亩。1987年5月发生在大兴安岭林区的特大火灾，火区面积1万km^2、死亡191人，12000户人家的住房被烧毁，56000人被迫迁移。

5. 雷击灾害的规律、特征和重要案例

据1983～1985年全国损失超过10万元的11次雷击火灾的统计，总损失1382万元，即平均每次雷击火灾损失120万元！雷击火灾发生在4～9月，尤其集中发生在7～9月雷雨多发季节。发生时间多在傍晚到后半夜（下班和休息时间），雷击火灾发生地点多为仓库（纺织原料仓库、石油和化工原料仓库等）。

近几十年来我国发生的最严重的雷击火灾是1989年8月12日9时55分发生在青岛市黄岛油库的、由油库罐区周围与雷雨云发生感应引起的雷击火灾。这次大火，从起火到8月16日18时被全部扑灭，共燃烧了104h，约有4万m^3原油被烧光，火焰高达300m，烧毁消防车和指挥车14辆，烧死19人，烧伤65人，过火面积13.4hm^2（200亩），直接经济损失3510万元。

第二节　海水的电学性质和电物理现象

一、海洋的一般表述

地球表面积约5.1亿km^2，海洋面积约3.6亿km^2，占地球总面积的71%。全球海洋体积13.7亿km^3。全球海洋平均深度3800m，最深处11034m。每年有50.5万km^3的海水在太阳辐射作用下被蒸发为水汽，约占大气层中总水汽量的87.5%，而陆地上每年被蒸发的水仅7.2万km^3，占大气层中总水汽量的12.5%。海洋是地球上水圈的重要组成部分，与大气圈、岩石圈相互依存，成为控制地球表面生态环境和生命活动的基本环节，并呈现以下特征：

1. 海洋是地球上能量过程的重要环节

由于海洋的面积是陆地面积的2.5倍，又由于单位海洋面积对太阳辐射热量的吸收要比陆地大25%～50%，而且海水的热容量大。由此，一方面，海洋是太阳辐射能量的巨大储存器，海水表面的平均温度要比全球陆地的平均温度高约10℃；另一方面，由于地球在赤道和两极受到太阳辐射能量的差异，造成赤道附近海水温度高于两极附近海水的温度，从而导致暖流从赤道向高纬度海域运动；同时海水在蒸发时也将相当部分的热量带入大气层。这些都是地球上主要的能量迁移和转换过程，影响到地球上的生态环境和生命活动。例如在第四纪的最大冰期，全世界冰川的体积是现代冰川体积的3倍，海平面比现代低130m。如果现代冰川全部融化，则海平面要比现在高60m。这将会使地球的生态环境发生明显变化。还应该看到，海洋——大气系统的能量和物质转换和平衡过程是地球上规模最大的物质和能量变化过程，也是影响全球气候、地表形态的重要过程。

2. 海洋是地球上无机物和有机物相互转化的重要环节

地球上的生命过程能够持续，生物能够进化，都离不开能量和物质的转化，其中无机物和有机物之间的转化尤为重要。在地球上，植物通过光合作用使无机物变成有机物，并且将太阳能转化为生物化学能；动物主要依靠消耗和消化植物（直接或间接）生存繁衍。动植物死亡后由于细菌、微生物的分解作用，又将有机物变成无机物，这一过程在地球上不断地进行。对这样一种生态系统可用两种指标描述，一种是静态指标，如生物量等；另一种是动态指标，如生物的生产率等。海洋中的生物量约为3×10^{10}t，仅是陆地上的1/200，但海洋中的生物生产率和陆地接近（海洋为4.3×10^{11}t/a，陆地为4.5×10^{11}t/a）。和陆地相比，海洋中的生物生产率与生物量的比值（相对生产率）要比陆地大约200倍，这是由于海洋中有机

物的生产主体主要是单细胞的低级生物，而陆地上的有机物生产者主要是多细胞的高级生物，因而海洋中将无机物转化为有机物的过程更为活跃。

3. 海洋作为一个物理系统，存在各种规模和类型的运动

这些运动包括：第一，由于海水密度变化引起的运动，例如海水的蒸发、冷却、结冰发生的密度变化使海水发生垂直方向的运动；或是海水由于含盐量（盐度）增加而发生下沉，到等密度面后再（可能）发生水平运动。第二，海面风力引起的海水运动，如风海流和风生环流等。第三，太阳、月亮、行星运动引起的潮汐。第四，海水运动速度变化引起的湍流。海水的这些运动会导致海洋的力学、声学、热学、电磁学、光学性质的改变，这都会引起生态环境和生物生命过程的改变。

4. 海洋的地壳和陆地的地壳虽然都是地球地壳的结构单元，但两者有一系列的差别

总体上说，陆壳较轻、较厚、较古老；洋壳较重、较薄（由于缺失花岗岩层）、较年青。由于地壳的均衡作用，较轻的陆壳浮起，较重的洋壳下沉，因此形成地球上大面积的海洋和有限的陆地。这是由陆壳和洋壳的物质组成不同所形成的。

综上所述，海洋是地球上影响生态环境和生命活动的重要环节。由于篇幅和主要研究内容所限，本书只讨论海水的电学性质以及海洋中最主要的电磁过程。

二、海水的电导率

海水的电导率与海水中所含离子的种类及浓度、温度及压力有关。影响海水电导率的最重要因素是海水中所含的离子的种类和浓度。海水中含有氯（Cl）、钠（Na）等80余种元素。海水中的含盐量用盐度（记为 S，单位‰）表示。全世界海洋中海水的盐度平均值为34.7（即34.7‰，通常简记为34.7）。在盐度为35的1kg海水中含氯离子19.34g（海水中氯离子的浓度称为氯度，记为 Cl，单位‰），钠离子10.77g，其余主要成分还有硫、镁、钙、钾等离子。1963年，海洋用表与标准联合小组（JPOTS）审定，盐度（S）和氯度（Cl）间的关系为：

$$S(‰) = 1.80655Cl(‰)$$

海水的电导率是长1m，截面积 $1m^2$ 的海水的电导，单位为：S/m。海水中主要的导电离子在海水离子中的重量百分比和对电导率的贡献见表6－2。

表6－2　盐度 $S=35$ 的海水，在23℃时各种离子的质量百分比和对电导率的贡献

离子种类	当量浓度，mol/L	质量百分比，%	对电导率贡献，%
Cl	0.558	55.2	64
Na^+	0.483	30.7	29
Mg^+	0.109	3.7	2.7
SO_4^{2}	0.007	7.7	2.3
K^+	0.010	1.1	1.1
Ca^{2+}	0.021	1.2	0.7
Br	0.001	0.2	0.12
HCO_3^-	0.002	0.1	0.06
Sr^{2+}	0.0001	0.0	0.004
合计		99.9	99.984

注：根据K·帕克的资料，引自《中国大百科全书》，海洋科学卷，1997。

从表 6－2 可见，海水的电导率 σ 主要取决于氯度（Cl），在 0℃时，海水电导率 σ 和氯度（Cl）的关系如下：

$$\sigma = 0.17875(Cl) - 0.029596(Cl)^2 + 0.001127(Cl)^3 - 0.0001902(Cl)^4 (S/m)$$

按上式计算，在 $Cl = 20$ 时，海水的电导率 σ 为 3.00182S/m（在 0℃时），相应的海水的电阻率约为 0.333Ω·m。标准海水（盐度 $S = 35$）在 17℃时的电导率为 4.54～4.81S/m（相应的电阻率为 0.20～0.22Ω·m），是铜电导率的 $1/10^7$，比玻璃的电导率高 10^{12} 倍。

海水的电导率随温度升高而增大，温度每升高 1℃，电导率约增加 2%。压力对海水的电导率的影响比温度小得多，压力每增加 1MPa，电导率约增大 0.001S/m。对深层海水，仍应该考虑压力对电导率的影响。

在外海，海水的盐度较高，可达 35～36；在近海，特别是在大河的入海口，海水盐度甚至在 30 以下。全球海水表面盐度的分布主要取决于不同海域的蒸发和降水；在高纬度区，海水的盐度还取决于结冰和融冰，在结冰时海水盐度升高，在融冰时，盐度降低。

海水的温度取决于太阳封锁，因此赤道附近海域表层海水的温度比高纬度地区高，其温差可达 30℃。海水的温度随深度增加而降低（因而电导率下降），在深度为 1000m 处海水温度 4～5℃；在 2000m 处为 2～3℃；3000m 以下海水的温度为 1～2℃；占全球海洋总体积 75% 的海水的温度在 0～6℃之间；全球海洋平均温度 3.5℃。

海水的密度是其盐度（S）、温度（T）、压力（p）的函数，海水的密度在 1.0255～1.0285g/cm^3 之间。

全球海水盐度、温度、密度的分布特点是：在赤道附近，由于热带降水充沛，海水盐度较低（$S = 34.6$），在南北半球的中纬度地区（20°～30°）盐度达极大值（S 接近 36），向两极附近盐度又降低，在 60°出现最低值（$S = 32.4$）。表层海水的温度在赤道附近最高，约 28～29℃，向两极降低至 0～1.9℃。表层海水的密度在赤道附近最低，约为 1.022g/cm^3，向两极逐渐升高，在极地海域可达 1.026g/cm^3。海水盐度、温度和密度的这些变化都会引起其电导率的相应变化。

海水的另一个电学参数是介电常数 ε，海水的介电常数 ε 也是海水盐度和温度的函数，也和电磁场的频率有关，但现在只有介电常数和盐度、温度和频率的半经验公式。在电磁场频率低于 10MHz 时，海水的介电常数 $\varepsilon = 81.5$。

三、海水中的电学测量和电磁波传播

对海水电导率的研究已经有近百年的历史，主要目的是通过测量海水的电导率确定海水的盐度。由于海水中主要导电离子是 Cl，因此在对全球各大洋的 135 个海水样品（深度 100m 以内）的氯度（Cl，%）精确测定的基础上，按下式转换为盐度：

$$S(\%) = 1.80655 Cl(\%)$$

在对上述海水样品测定了电导率，并将测得的结果与盐度 $S = 35.000$ 的海水在一个标准大气压（1atm）、15℃时的电导率相比，得出电导比 R_{15}。

1966 年，联合国教科文组织推荐根据上述测定结果得出的海水电导比 R_{15} 和盐度的关系：

$$S(\%) = -0.0896 + 28.2970 R_{15} + 12.80832 R_{15}^2 - 10.67869 R_{15}^3 + 5.98624 R_{15}^4 - 1.32311 R_{15}^5$$

电磁波在海水中传播时会在海水中产生传导电流，并使电磁波的能量（或幅度）明显衰减，通常记电磁波的幅度衰减为原来的 1/e 时的距离为电磁波的穿透深度，习惯上用 D 表

示，穿透深度 D 和海水的电导率 σ 及介电常数 ε 有关，而且和电磁波的频率 f（以 Hz 为单位）呈减函数关系，即有：

$$D = 1/\sqrt{\pi\mu\sigma f}$$

将海水的磁导率 $\mu = 4\pi\times10^{-7}$H/m 及电导率 $\sigma = 4.54$S/m 代入，有：

$$D = 250/\sqrt{f}(\text{单位:m})$$

根据上式，电磁波频率为 1MHz（10^6Hz）以上时，在海水中的穿透深度不超过 25cm。而对极低频的电磁波，如 0.01Hz 的电磁波，穿透深度可达 2500m。这种极低频的电磁波可用于海洋深处的潜艇间通讯和海底矿产资源勘探。目前陆地和水下潜艇无线电通讯所用电磁波的频率在 30kHz 以下（波长约 110km），这种频率的电磁波在地表和高度为 70～80km 的电离层之间反射传播并垂直透入海水，潜艇可在海面以下 30m 深处收到这种频率的电磁波。若用频率低于 300Hz 的极低频超长波（波长约 10^6m），则在海面以下 120m 的核潜艇可用 300m 长的拖拽接收天线接收到 4600km 远处的指令。

地球大气电离层发生的各种动力学过程，包括来自太阳的等离子流和地球大气电离层和地磁场的作用都可能产生频率范围很宽的电磁波，其中频率极低，波长很长的，能够穿透海水达到海底，甚至进入上地幔。海水和海底接触处的电化学过程，海底岩石中流体的渗透过程，海水与岩石中流体间的扩散吸附过程，也会在海洋中产生电场，其强度达 100μV/m。在浮游植物和细菌的聚集区也发现过生物电场。海水中各种较大尺度的运动，如潮汐、海流，都能产生相应的感应电磁场。如潮汛引起的磁场半昼夜变化幅度可达 2.4G（伽马），电场的变化幅度可达 0.6μV/m。研究海水各种尺度运动所产生的感应电磁场，研究这种电磁场变化的测量方法；进而通过电磁测量来研究海水各种尺度的运动，也是海洋电磁学研究的重要方面。

第三节　地壳和岩石圈的电学性质概述

一、矿物岩石电学性质的一般表述

根据矿物在导电能力上的差异，可分为导体（如自然金、自然铜、石墨）、半导体（如金属的氧化物和硫化物）、介电体或绝缘体（如石英、长石、云母等常见的造岩矿物）。导电矿物的电阻率 $\rho = 10^{-6} \sim 10^{-4}\Omega\cdot$m；半导体类矿物的电阻率 $\rho = 10^{-6} \sim 10^{6}\Omega\cdot$m；不导电的介电体或绝缘体矿物的电阻率 $\rho > 10^{6}\Omega\cdot$m。不同的岩石由于矿物组成不同、组织结构不同、孔隙大小、岩石中孔隙所占比例（孔隙度）和孔隙中流体的不同，其电阻率可相差 20 个数量级。表示岩石电学性质的另一参数是电导率 σ。在外电场恒定时，岩石的电导率 σ 和电阻率 ρ 之间为倒数关系即 $\sigma = 1/\rho$。同类岩石（如沉积岩）由于其孔隙度和孔隙中流体性质（流体种类、液体含盐浓度——矿化度、分布特征）的不同，其电阻率也可相差 2～3 个数量级。

表 6-3　部分岩石矿物及污染物的电阻率

岩石矿物种类	电阻率 ρ，$\Omega\cdot$m	污染物种类	电阻率 ρ，$\Omega\cdot$m
黏土，泥灰岩	3～40	生活垃圾	12～30
砂质黏土、粉砂岩	25～300	建筑垃圾	200～350

续表

岩石矿物种类	电阻率 ρ，Ω·m	污染物种类	电阻率 ρ，Ω·m
砂、砾石（干燥）	800～5000	工业淤泥	40～200
砂、砾石（湿）	200～400	废金属	1～12
石灰岩、石膏	500～3500	废纸（湿）	70～180
砂岩	300～3000	砂铸模	400～1600
岩盐	>10000	焦油	300～1200
花岗岩	2000～10000	废油漆、涂料	200～1000
片麻岩	400～6000	服装清洗剂	30～200

岩石类介质在外界电场作用下，产生的电流是由岩石电导率 σ 决定的传导电流和由岩石介电常数 ε 决定的位移电流之和。在外加电场频率改变时，在岩石中的全电流中，传导电流和位移电流所占比例将会改变。因此，可认为，岩石的电导率 σ 和介电常数 ε 都是频率的函数。在高频时，岩石的位移电流变化明显；在低频时，某些岩石的激发极化电流明显。此时，电场和电流之间存在相位差，也就是说，岩石的介电常数 ε 和电导率 σ 不仅是外加电场频率的函数，而且也是复数。岩石的电导率 σ 是频率的函数 $\sigma(\omega)$，介电常数 ε 也是频率的函数 $\varepsilon(\omega)$。因此认为，岩石的电导率和介电常数都有频散特性。另外大部分岩石和矿物在水平方向的电阻率 ρ_n 和在垂直方向上的电阻率 ρ_t 不同，亦即表现为各向异性，并规定其各向异性系数 $\lambda=\sqrt{\rho_n/\rho_t}$。几种沉积岩的各向异性系数见表 6－4。

表 6－4　几种沉积岩的各向异性系数

岩石名称	各向异性系数（λ）
层状砂岩	1.1～1.6
泥质页岩	1.41～2.25
碳质页岩	2.0～2.8

表示岩石电学性质的另一参数是极化率 η，当电流通过固相岩石（或矿体）与孔隙流体界面偶电层时，或者是电流通过岩石孔隙通道中固相和液相界面的偶电层时（这一过程通常称为“充电”），在图 6－3（a）上，岩石的固相表面内侧带负电荷，而在与之相接的液相表面上带正电荷，在外电场的切向分量 E_t 作用下，仅有小部分液相中的导电离子发生迁移，而偶电层并没有明显变化。但外电场的法向分量 E_n 的方向与岩石表面偶电层电场的方向一致，这样在 E_n 的作用下，由于岩石颗粒表面和孔隙流体的电化学作用，原来的偶电层上，电流流入的一端，正电荷过剩，而在电流流出的一端，正电荷不足，这样产生的电场称为激发极化电场（图 6－3）。

在矿体附近，外加电场 E_1 作用下会产生的激发极化产生的电场 E_2，激发极化电场的强弱与岩石孔隙中流体的电导率、岩石的渗透率、岩石固相中导电矿物的体积含量及固相中黏土的阳离子交换能力以及外加电场强度有关。表征岩石或矿体激发极化过程强弱的参数是极化率（记为 η），其定义是激发极化产生的电场强度 E_2 与矿体附近总电场强度 E_1+E_2 的

比值：

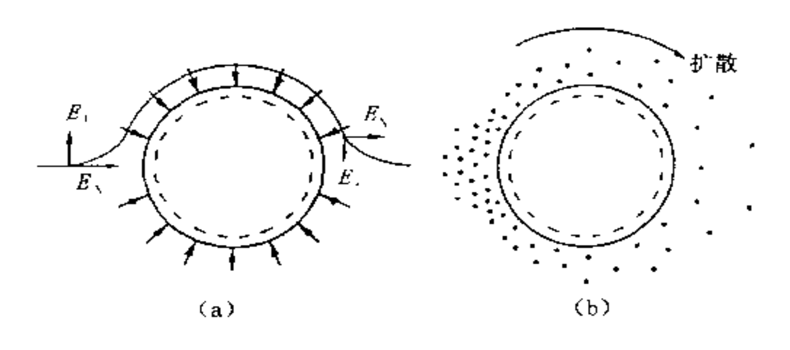


图6－3　矿体附近激发极化过程示意图

$$\eta = [E_2/(E_1 + E_2)] \times 100\%$$

极化率 η 是无量纲参数，通常用百分数表示，表6－5是常见岩石和矿物的极化率和导电矿物的体积含量。从表6－5的数据可见，岩石或矿物中的导电矿物体积含量增加时，其极化率变大。

在外加电场取消后，激发极化电场将逐渐衰减为零，岩石和矿体附近的电场恢复到原来状态（这个过程也叫"放电"过程）。由于不同岩石或矿体在外加电场取消后激发极化电场的衰减过程不同，因此对激发极化电场衰减过程的观测，有可能对产生激发极化的岩石或矿体的特征或性质进行判别。

表6－5　部分岩石和矿物的极化率及导电矿物的体积含量

岩石和矿物	极化率（η），%	导电矿物体积含量，%
石灰岩	1～3	＜1
大理岩	1～3	＜1
角砾状黄铁矿化大理岩	20～60	4～20
绢云母石英岩	0.5～3	＜1
石英片岩	2～4	＜1
石墨石英片岩	40～90	3～25
片麻岩	2～4	＜1
石英砂岩	1～6	＜1
花岗岩	1～3	＜1
闪长岩	1～3	＜1
软锰矿	15～50	15～50
赤铁矿	3～25	

二、地球内部的电阻率（或电导率）及其变化规律

1. 地球内部的电阻率（或电导率）

目前对地球内部结构研究的主要方法是各种探测深度不同的地震方法。地震探测方法能够对地球内部的地壳、岩石圈、地幔、地核的位置和分界面作出界定，地壳内部的电阻率

（电导率）是地震波速度以外的另一种物理性质，根据电阻率（电导率）的差异可判断地球内部各部分在电学性质上的差异，配合其他地球物理探测资料（如地震、地温、密度等）能判断地球内部各部分的矿物组成和结构，减小由单一地震方法反演的多解性范围。另外，地球内部各部分的电导率随温度变化敏感，因此，可能根据地球内部电导率的变化解释评价地球内部的热状态变化。

地球内部各部分的电阻率是分为有差异的层段的。在地表附近几十千米深度以内的沉积岩和风化结晶岩石的电阻率的数值范围约在 0.5～1000Ω·m。深度达到基岩层时结晶的火成岩或变质岩的电阻率可达 1～100 万 Ω·m，在结晶基岩底面以下 5～10km 处电阻率达极大值。

在深度约 30～40km 处，即在地幔的顶部，电阻率约几百欧姆米（有研究认为约为 200Ω·m），超过这一深度，在地幔中的电阻率随深度增加而减小，其原因是温度（在深度为 40km 处温度可达 800～1200℃）增加使矿物的分子电离，所产生的离子甚至可使在常温下的绝缘体变成导电体。在深度为 100～200km 处（属上地幔的地震波低速层段），其电阻率降低为 10Ω·m，在深度为 400～650km（属上、下地幔之间的过渡层段）处更降低到 1Ω·m，在 1500km 深处（属下地幔）电阻率只有 0.1Ω·m。根据地磁产生的地磁发电机假说（见第五章）地核的电阻率必须很低（电导率很高），否则地磁发电机难以为继。有人估计地球外核的电阻率约为 3×10^{-6}Ω·m 或电导率为 3×10^{5}S/m（F.Stacey）。

在地球上很多区域，地壳下部及上地幔处的电阻率只有 200Ω·m。若认为在这一深度的岩石是玄武岩，而即使考虑到温度和压力对玄武岩电阻率的影响，其电阻率也应该不小于 10000Ω·m，因此，有人认为在这一深度处岩石电阻率低至 200Ω·m 以下，可能是地壳下部岩石孔隙度很大或有含水矿物存在所致。

2．岩石矿物电阻率随温度和压力变化的规律

岩石和矿物随温度升高，其电阻率明显下降，其原因是在高温条件下岩石和矿物的分子电离，使其导电性能增强。有实验研究表明，某些干燥岩样的温度从 20℃ 增加到 1200℃ 时，其电阻率减小到 20℃ 时电阻率的百万分之一。对于多数岩石，当温度超过其熔点的一半时，从岩石晶体的晶格中由于热作用而分离出来的离子数目迅速增加，其电导率的增大极为明显（相应的电阻率减小也极为明显）。当温度达到岩石和矿物的熔点时，随着热作用使晶格破坏而变成离子化的导体，其电阻率急剧减小（电导率明显增加）。

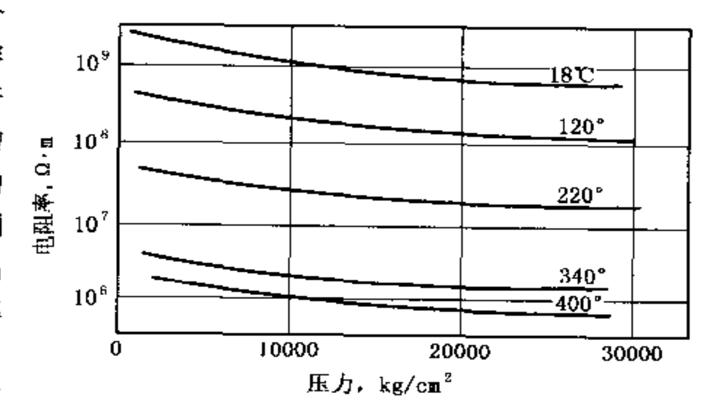


图 6－4　玄武岩样品的电阻率随温度、压力变化的规律

岩石和矿物的电阻率随压力变化的规律随岩石和矿物的种类而异。像玄武岩、辉绿岩、角闪岩等，在压力增加时，其电阻率均匀降低（见图 6－4）。压力增加导致电阻率降低的原因是岩石矿物中晶格变形使导电离子的数目增多。

还有一类含微斜长石的岩石在外加压力较低时，其电阻率下降（原因与上相同），但在压力超过某个临界值后，其电阻率不仅不下降，反而增加，其原因是在压力增加导致晶格压

缩，而使离子的迁移率降低。

对于导电性能主要取决于岩石孔隙中水的含量和矿化度的岩石（如沉积岩），在压力增加而使岩石中的孔隙、裂缝闭合，因而使导电通道变小时，其电阻率升高。但当压力增加使岩石产生裂缝时，岩石中导电的通道体积增加，致使其电阻率明显下降。

与温度对岩石电阻率的影响相比，压力对电阻率的影响要弱得多。如对前例中在温度变化了1200℃、电阻率降低了6个数量级（降低为20℃时的$1/10^6$）的干燥岩样，在外加压力从零增加到4900MPa时，其电阻率仅变化不到100%。

三、地电场及其变化规律

地球内部的电场包括大地电场和自然电场两部分。大地电场是地磁场变化和地球大气层中各种电流体系在地球的地表以下各层段产生的感应电场，其分布涉及全球，是大尺度的随时间变化的场。自然电场则是地壳中某些局部的物理、化学过程产生的电场其尺度较小，而且随时间变化的规律也不如大地电场明显。

1. 大地电场及其变化

大地电场起源于地磁场的变化，因而也有区域分布特征。早在1936年，根据多年的观测资料绘制出在世界时18时的全球大地电流涡旋线分布图，见图6－5。

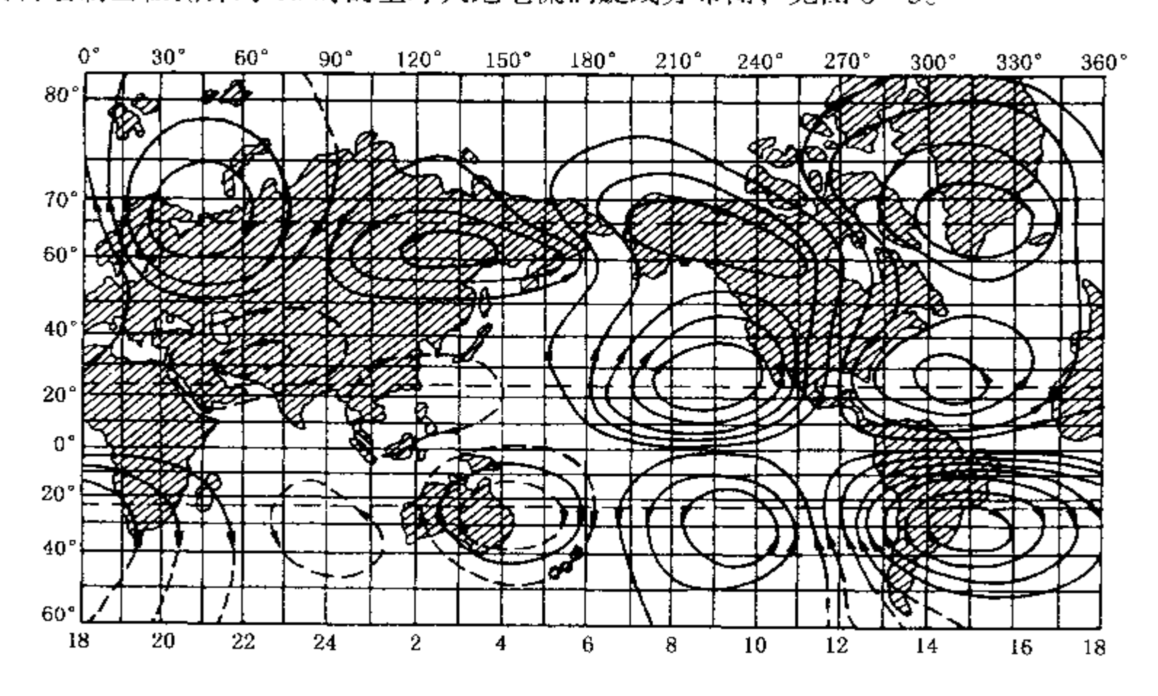


图6－5　世界时18时的全球大地电流涡旋线分布图

（根据O.H.Gish和W.J.Rooney，1936）

（实线—电流等值线；虚线—实线电流值一半的等值线）

在图6－5上可见，在赤道附近有8个大地电流涡旋区分布，这8个区域的中心都在南北回归线附近；在北半球还有4个大地电流涡旋分布区，其中心在北极圈附近。在南半球还有4个大地电流涡旋分布区，其中心在南极圈附近（在图6－5上未画出）。每个涡旋区都有其区域特征，所以也称为区域电场。

根据现代观测结果，地表的平均电流密度为$2A/km^2$。若取大陆的平均电阻率为10Ω·

m，海洋的平均电阻率为 0.2Ω·m，则可以算出，大陆的电场强度（$E=\sigma j$）为 20mV/km，海洋的平均电场强度为 0.4mV/km

由于地球上各个区域差别很大，因此在地球上各地的电流密度和电场强度都明显不同：在中纬度区域，大地电场强度不超过 0.5～1mV/km，在高电阻率的基岩层段，大地电场强度也不超过 3～10mV/km。但在极地区域，大地电场强度可达 1V/km，在发生磁暴等强干扰时其至可达 10V/km。

由于趋肤效应，大地电场强度随深度增加按指数规律衰减，大地电场的高频成分衰减得快，在电阻率高的层段也衰减得快。计算表明，周期为 24h 以下的谐变场，最大穿透深度不超过 1200km。

大地电场有日变化规律，其原因是：在图 6－5 上，大地电流涡旋中心相对与地球和太阳的连线的位置是不变的，这样在地球自转一周时，地球上的每个大地电流涡旋中心将依次穿过每一条子午线。或者说，地球上的每个固定的观测点将依次被同纬度上的各个涡旋中心或其附近的大地电流等值线穿过。这样大地电场有日变化的周期 大地电场的这种日变化与地磁场的日变化规律相似，但地球的导电规律并不是纯电阻性的，因此大地电场和地磁场在相位上有差异。大地电场的日变化有周期为 24h 的谐波，也有以 12h、8h、6h 为周期的谐波。大地电场除了幅度随时间有各种周期性的改变以外，其方向也会有周期性的变化。

由于大气层中的雷电和地球内部的物质和能量运动，大地电场还有各种短周期的变化，其频谱范围约是在（10^{-4}～10^{4}）Hz 范围内连续分布。在 1Hz 附近大地电场的幅度出现极小值 由雷电引起的大地电场的频率约为（1～10^{4}）Hz；由地磁脉动引起的大地电场的频率约 1～10^{3}Hz；由于太阳辐射变化、电离层电流体系的扰动引起的地球内部大地电流的变化（地电暴）的频率为（10^{-3}～10^{-4}）Hz，在极地附近，强度可达 10mV/km。

2. 自然电场及其变化

自然电场发生在地壳中的局部区域内，其尺度要比大地电场小得多。而且主要发生在地壳的浅表层段。通常的自然电场分为扩散吸附电场、氧化还原电化学电场、渗流电场。

扩散吸附电场：在地壳中多数岩石和矿物的导电机制属离子导电型，即岩石固相骨架基本是不导电的，导电的载流子主要是岩石孔隙流体中的正离子和负离子。不同岩石的孔隙中所含流体的成分（如含水或石油、天然气）即使都含水，则水中所溶解的盐类和浓度不同，因此其导电性能是不一样的。在两种导电性能的岩石的分界面上，由于不同岩石孔隙中，导电离子的种类不同，其迁移率也不相同，因此会产生导电离子的扩散：导电能力强、迁移率高的离子向导电能力弱、迁移率低、离子数目少的区域运动（扩散），在离子运动过程中，孔隙通道的壁（固相部分）还会选择某些特定的离子（如黏土颗粒表面选择性的吸附负离子，因此可将黏土或泥岩视为只能通过正离子的理想薄膜）。这种离子的扩散过程会在两种岩石的接触面上产生偶电层。偶电层的形成又阻止导电离子的进一步扩散，从而达到某种动平衡。在两种不同的岩石的接触面上产生电位差，这就是扩散吸附电位。例如在两种孔隙水矿化度不同的砂岩的接触面上，若正离子的迁移率大于负离子的迁移率，则在矿化度高的砂岩一侧，由于大量正离子迁移到离子浓度低的区域，因此带负电；而在离子浓度低的区域，由于大量正离子迁入，因此带正电。这时产生的电位差与两种砂岩中孔隙水的矿化度差异有关，也与温度有关。扩散吸附电位差的数值可达几十毫伏。这种电场在两种不同的岩石界面上产生，因此又称为接触扩散电场。

氧化还原电化学电场：如果在地面以下有一个像硫铁矿一类的电子导电的矿体，其一部

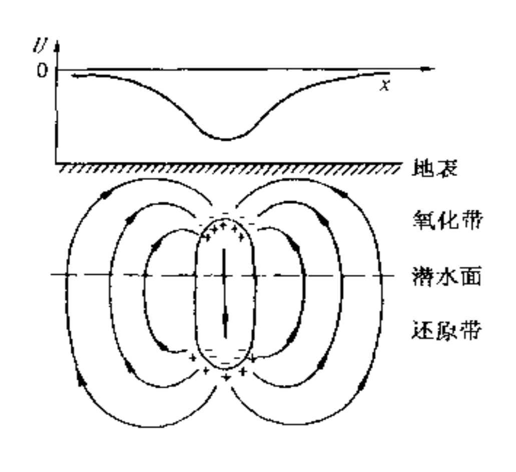


图 6－6　矿体附近氧化还原电场示意图

分在潜水面以上，而另一部分在潜水面以下。在潜水面以上的矿体受到氧化作用，并在氧化过程中失去电子，因而带正电，并在矿体周围产生负电荷富集区。在潜水面以下的矿体，由于基本和空气隔绝，处于还原状态，因获得电子而带负电，并在矿体周围产生正电荷富集区（见图 6－6）。这样就在矿体周围产生由于矿体氧化还原差异的电场和电流流动。这种电场是一种电化学场，习惯上称为氧化还原电场，其数值可 800～900mV，是自然电场中幅度最大的一种。

渗流电场：地下水流过孔隙岩石时，由于多数岩石孔隙通道的壁有吸附负离子的能力，因此在岩石的孔隙通道中，较多的正离子沿水流方向运动，在地下水流出的下游，正离子过剩，而在地下水的上游，负离子相对过剩，这样产生与水流方向相反的电场，就是渗流电场，也叫过滤电场，其强度与地下水流动的压力差、地下水的电导率等成正比，与地下水流动的粘滞系数成反比。实际观测到的渗流电场强度可达 100～200mV/km。在山坡上，经岩层过滤的地下水，也可能形成水流低处为负，高处为正的电场，这叫做山坡电场，是渗流电场的一种。在河床、岩溶和泉水活动区也经常发现渗流电场。

除了上述三种电场以外，地壳中某些矿物和岩石（如石英）以及冰都有压电效应，一些矿体在压应力作用下还有逆电声效应（震电效应），这些效应所产生的电场都是地球自然电场的一部分。这些电场也有日变化和年、月变化，但其变化的规律性远不如大地电场。

对大地电场和自然电场的野外观测可研究地球上电场随时间和空间分布的特征，除了可研究地球上电磁活动的规律外，还可以勘测地下矿体和地下生态环境的改变。

四、电磁辐射污染

1．电磁辐射的一般表述

高强度的电磁辐射会使辐射场内产生物理、化学和生物学效应，并可能对人体产生伤害。这就是电磁辐射污染。由于无线电广播、电视、机场导航、微波通讯等技术的广泛使用和电力机车、地铁、高压输电的线路网络越来越密，使地面上的电磁辐射大幅度增加。

表 6－6　电磁辐射的频率、频段

频　段	符　号	频率范围，MHz	波长范围，m	应用范围
极高频	EHF	$(3\sim30)\times10^4$，(30～300GHz)	0.001～0.01	微波技术
超高频	SHF	$(3\sim30)\times10^3$，(3～30GHz)	0.01～0.1	微波技术
特高频	UHF	$(3\sim30)\times10^2$，(0.3～3GHz)	0.1～1	微波技术
甚高频	VHF	30～300	1～10	电　视
高　频	HF	3～30	$10\sim10^2$	无线电广播
中　频	MF	0.3～3	$10^2\sim10^3$	无线电广播
低　频	LF	0.03～0.3	$10^3\sim10^4$	无线电广播

影响生态环境的电磁辐射污染源可以是天然的和人工的。天然的电磁污染源包括：雷暴、火山爆发、地震、太阳黑子活动引起的磁暴，宇宙中的脉冲星或类星体等。人工的电磁辐射源如无线电广播、电视、微波通讯等技术装备的发射的各种频段的电磁波；大功率电机和高压输电线附近工频交变电磁场；各种脉冲放电，强电流电路切断和闭合时的火花放电，各种家用电器的放电等。近年来，电磁污染源有多元的趋势：无线电广播发射台（中波和短波），电视发射塔（超短波、微波），城市高层建筑顶上的移动通讯站，城区周围的卫星地面站，超高压输电线和变电站，工业用、医疗用高频设备（高频电炉、微波治疗仪等），个人通讯工具（手提电话、寻呼机等），家用电器（微波炉等），机动车的电点火装置等。

自然界的电磁污染源，如磁暴、雷暴可影响全球的通讯系统。人工的电磁污染则可在局部影响通讯和导航系统，例如寻呼台和移动通讯网络干扰飞机导航系统，还可影响收听和收看广播和电视的质量：广播中出现噪声，电视机画面上出现："雪花"。过强的电磁污染还可能影响有机体，使细胞的活性改变甚至发生变异。

2．自然界的电磁辐射对地球空间环境的影响

宇宙和太阳辐射改变引起的地球大气层中的磁暴、强粒子流辐射、电磁辐射等，从本质上说都是太阳或宇宙向地球赋予能量的过程，因此不可避免的会对地球的空间环境产生变化，因此也可能对人类的生存环境和活动造成影响，根据近年来的研究，这些影响至少有以下方面：

磁暴及其对输电系统的作用。太阳耀斑爆发时，产生的高速等离子流（太阳风）以 1000～2000km/s 的速度向地球运动，约在耀斑爆发后 21h 到达地球的大气层并引起地磁场的强烈扰动，这就是磁暴。在磁暴开始的一瞬间，地磁场的水平分量突然增加并能持续 2～6h。磁暴引起的地磁场变化会在地球表面产生感应电场，其强度可达 20V/km。这个电场会在 Y 型连接的输电系统的接地线上产生地磁感应电流。这个电流与 50Hz 的交流电相比，可看作直流并可作为输电系统变压器上的偏置电流，并会使变压器发热，甚至烧毁。1989 年 3 月 10 日，强磁暴使加拿大魁北克一个输电系统瘫痪，600 万人的居民区停电 9h，直接经济损失 5 亿美元。

太阳耀斑产生的高能粒子流对人造卫星的影响，来自太阳的高能粒子流可能穿透人造卫星，甚至进入卫星的电子器件，产生误触发，致使出现伪指令或错误数据，使卫星操作控制系统出现故障。低能粒子流可使卫星表面充电，从而使卫星各部件之间出现很高的电位差（甚至可达 2000 多 V）能将某些电子器件击穿，使卫星出现故障。例如 1994 年 1 月加拿大的 Anik 通讯卫星受强磁暴的影响失控，不得不使用备份系统。在太阳耀斑爆发期间，地球外层空间粒子流通量会比背景值大几百倍，对在这一区域活动的卫星和宇航员构成威胁。例如，美国用亚特兰蒂斯号航天飞机发射伽里略卫星时，宇航员眼睛曾感受到由于高速粒子流穿过视网膜引起的强烈闪光。若在高速粒子流通过时宇航员在舱外活动，则可能受到超剂量的辐射。据统计，1971 年 2 月～1986 年 11 月，由美国发射的卫星的 1589 次事故中，70% 与空间环境有关，其中 621 次是由于高能粒子流引起的卫星控制系统功能的紊乱。据统计我国的通讯卫星由于空间环境引起的故障占总故障的 40%，这些故障主要是空间的高能粒子流引起卫星带电或卫星控制系统电路故障。例如我国发射的"风云卫星 B"就是因为受到高能粒子流影响，使卫星姿态控制系统失去作用，使之过早结束使用寿命。

太阳耀斑爆发还会使高层大气的密度发生变化，使卫星或航天飞机的工作受到影响。例如美国的哥伦比亚号航天飞机第一次升空时，由于受到太阳耀斑爆发的影响，高层大气密度

增加，因而航天飞机的阻力比正常情况增加了15%。由于备用燃料充足并采取了应急措施，才避免了事故。美国的“天空实验室”（Skylab）卫星由于太阳活动峰年引起的高层大气阻力增加，比原计划提前两年坠毁。美国的另外一颗太阳峰年（SMM）卫星在一次强磁暴开始时，轨道高度下降了0.5km，在整个磁暴期间下降了4.8km，因此提前坠落。

太阳耀斑对地球大气层的影响。强太阳耀斑可能引起中高纬度大气环流的变化，从而影响天气过程。有统计结果表明，在太阳耀斑发生后第3～4天，大气层的雷暴活动增加，在耀斑发生后10d雷暴最频繁。这些研究结果有利于天气预报，例如长期和超长期的降雨预报。

太阳耀斑爆发时产生的高速质子流会使地球大气层的成分有某些改变，因而也会影响人类的生存环境。1965年2月，由于太阳耀斑产生的质子流使地面的中子数目增加了90倍，大气中14C同位素增加了10%。1972年8月，太阳耀斑发生时，由于高速质子流的作用，平流层中相当长时间内臭氧减少了15%。

太阳耀斑对地球上通讯系统的影响。当太阳耀斑发生时，太阳辐射中的X射线和紫外线大幅度增加，甚至可增加几个数量级，致使短波无线电通讯受到干扰。磁暴引起的电离层的变化还会使甚低频（10～100kHz）导航系统发生错误，例如，1989年3月由于太阳耀斑引起的磁暴使地球西半球低纬度地区的短波无线电通讯系统60次中断，其中两次中断时间长达12h以上，使轮船、飞机的导航系统失灵。1993年3月10日，一次爆发时间长达7.5h的太阳耀斑爆发（就是前文提到的是加拿大供电系统发生故障的那一次）产生的磁暴，不仅使美国的气象卫星向地面发送云图中段，而且军事侦察卫星跟踪的几千个目标近于失踪。

3. 影响电磁辐射场的因素

以下讨论的主要是与人工电磁辐射场有关的各种因素。影响电磁辐射强度的因素称为场强影响因素，这些因素是：

功率。电磁发射设备的功率越大，其辐射场强越大，发射设备的功率与辐射场强成正比。

频率。一般情况下当发射设备的发射信号频率升高时，使其发射电流增大，因而发射功率增加，致使电磁辐射场强增大。例如对某发射设备的测试表明，当发射频率为6.5MHz，在距场源2.5m处辐射场强为8V/m，当发射频率增加到17.49MHz时，距场源同样距离处的发射场强增大到18V/m。显然，这是发射功率随频率增加所导致的结果。

与场源距离。与场源的距离增加时，随辐射功率在空间的弥散，辐射场强减少。例如，在距某发射设备10cm时辐射场强为170～250V/m，间距增加到0.5m时，辐射场强降低到53～65V/m，间距增加为1m时，场强进一步降为24～31V/m，间距为2m时辐射场强降低到最小值。

空间内有无金属物品或反射电磁波的器件。在高频磁场作用下，在金属或导电材料中会产生高频涡流，由于感应电流作用，将产生二次电磁辐射，使在空间的某些部位电磁辐射场强增大。因此在电磁辐射发射设备附近应尽量减少金属及能产生二次辐射的物品及器件。

另外对有电磁辐射的设备安装屏蔽（如金属网罩等）能有效地减少电磁辐射。

4. 电磁辐射对人体的影响

在生物机体中都含有极性分子和无极性分子，在受到电磁场作用时，极性分子重新排列，无极性分子则可能被磁化。若电磁场的频率很高，在机体中极性分子重新排列和无极性分子磁化的过程相当迅速，即极化方向的改变和磁化方向的改变迅速，因此在发生极化方向

改变的极性分子和没有受到电磁场作用因而没有发生极化方向改变的分子之间会由于快速的摩擦和碰撞而发热，当电磁场辐射强度在一定范围内时，这种辐射产生的热量对人体有良好的作用（如超短波治疗仪等理疗设备的作用）。但当电磁辐射超过机体的忍受范围时，则会破坏人体的热平衡，引起灼伤或机体的变化（如眼球水晶体的混浊等）。电磁辐射对人体的伤害与电磁辐射的频率有关，频率越高、波长越短的电磁辐射对人体的伤害越强，其原因是频率越高的电磁辐射在人体内的穿透距离长，容易伤害脏器，同时频率越高的电磁辐射在机体内产生的分子转动强烈，热效应明显。因此微波频段的电磁辐射对人体的伤害最明显。若把波长极短的红外线和紫外线辐射也作为电磁辐射的话，波长为7500～13000Å的红外线对眼球的伤害明显，而紫外线对人体的伤害的主要部位是皮肤的热灼伤，其中波长为2500～3200Å的紫外线对皮肤的伤害最明显。除了电磁辐射的热作用外，人体长期受电磁辐射作用，虽然体温没有明显增加，但会出现心率、血压的改变以及失眠、健忘等神经性症状。

目前国家环境保护局制定的《电磁辐射防护规定》，在24h内任意连续6min内的电磁辐射强度平均值应小于40μW/cm^2。目前城镇居民受到的人工电磁辐射的来源大致有三类。其一是公共的无线电和微波发射装置如广播电视发射台（塔）。我国目前已经有各种广播电视发射设备10235台，总功率13万kW，这类设施是设计标准较高，北京、上海、天津、沈阳、武汉、南京、青岛、大连、成都等大城市的发射塔高度在300m以上。因此虽然其发射功率巨大，但其附近居民区的电磁辐射强度并未超标。例如在北京玉渊潭的发射总功率为240kW的、发射7套电视节目和5套调频广播、塔高405m的中央广播电视塔，在其东侧250m处地面，最大电磁辐射强度仅为2.84μW/cm^2，在其东北方向400m处高层建筑中的电磁辐射强度为3.28μW/cm^2，都低于40μW/cm^{2}的国家标准。这一类电磁辐射污染源还有设在市区内高层建筑物楼顶的移动通讯基站，我国目前已有各类通信发射设备8万多套，发射总功率约5kW。在这种通讯基站天线主射方向上、相距30m的高层建筑物内的辐射强度达18～38μW/cm^2，（基站为单网站时）甚至可达90～446μW/cm^2（基站为多网站时）。在基站定向天线高度低于周围建筑物时，而且当天线的发射方向正对建筑物时，电磁辐射污染会严重影响居民的正常生活。已有资料表明，在一带通讯基站附近的居民，出现神经系统的各种症状（头晕、耳鸣、容易疲劳），而且冠心病、血压和心律改变等病症明显增加。北京市在（移动通信建设项目环境保护规律规定）（2000年4月1日起实施）中明确要求：在移动通信发射天线主射方向50m以内，非主射方向30m以内，不允许有高于天线的医院、幼儿园、学校、住宅等建筑物。移动通讯台站的室外天线要安装在高楼楼顶中央或电梯间的顶部，天线与楼顶间距离不能小于2.5m。第二类是移动的、非专用的设备发出的电磁辐射污染，如在公路和铁路附近的居民区内，由于汽车和电力机车发出的电磁辐射污染。汽车的电火花形成的电磁辐射的频段很宽，为MHz级至几百MHz级，在10～25MHz频段内污染最强。小汽车的电火花污染略轻，摩托车、卡车的电火花污染较强。这一类电磁辐射的强度还与车辆的点火系统类型、车辆行驶速度、车辆磨损程度有关。另外根据测量结果，在距离铁路约50m处的居民区内，电力机车产生的电磁辐射已经能影响电视的收看和广播的收听效果。第三类是电磁辐射污染源是家用电器和个人用通讯工具（移动电话）。家用电器中，微波炉在开机使用时在其附近5～10cm处，由于屏蔽不完善，随产品的屏蔽功能不同，泄露的电磁辐射强度可达1～230μW/cm^2。尽管移动电话的发射功率已经从3～5W降低到目前的0.25～2W，但在使用时其电磁辐射强度为几百μW/cm^2，最大的甚至达1800μW/cm^2。由于使用时，移动电话的天线距离人体的要害器官很近，因此过长时间使用移动电话对人体并不有

利。到2001年上半年为止，中国已有1.16亿部个人用移动电话（手机），而且还以每月500万个用户的速率增加。由于对移动电话的电磁辐射污染的认识不够（相当多的手机甚至并不标明其电磁辐射功率或强度），因此移动电话很可能是下一代对居民生活影响最明显的污染源。

有些电磁辐射虽然并不直接引起对人体的伤害，但对人体上的专用器具有作用，例如，美国就发生过一起由于电磁辐射干扰使心脏起搏器失灵而致病人死亡的案例。

电磁辐射污染的传播途径有二：一是通过空间直接传播，二是通过线路的电磁耦合传播。防止电磁辐射污染的方法之一是对有电磁辐射的设备实施区域控制，即将电磁辐射源集中在离居民区较远的区域，并在该区域设置安全隔离带。由于绿色植物对电磁辐射有吸收作用，因此增加绿化面积有助于减弱电磁辐射污染。二是采用屏蔽措施，或对有电磁辐射污染的源用金属材料做成网罩将泄露的电磁辐射减弱；或将要重点保护的部位和设备用金属网罩或涂层屏蔽。

表6－7　环境电磁辐射允许辐射强度标准

波段波长，m 频率，MHz	电磁辐射强度单位	安全区（级）标准	中间区（Ⅱ级）标准
长、中、短波　10～3000m 30～0.1MHz	V/m	＜10	＜25
超短波，1～10m 300MHz～30MHz	V/m	＜5	＜12
微波，0.001～1m 300000MHz～300MHz	μW/cm^2	＜10	＜40

注：资料摘引自《环境电波卫生标准》(GB 9175—88)。

第四节　环境地球物理学中的电学勘测方法

电学勘测方法或电法勘探是根据岩石、矿体、污染物在电阻率、介电常数的差异，通过观测自然界存在的电场的时间、空间分布特征或观测在人工建立的电场在勘测目的物附近分布和变化特征，根据这些观测结果，可以查明矿体，可以研究地电场的时间、空间变化规律，可以研究地电剖面，可以判断生态环境的变化。电学勘测方法是从矿产资源的电法勘探延拓来的，按其观测的内容，可分为自然电场法、电阻率法、激发极化法、电磁感应法和地质雷达等方法。

一、自然电场法

根据地下矿体和污染体等异常体与周围土壤和岩石在电化学活动性的差异所产生的自然电位，如扩散吸附电位、氧化还原电位等。沿固定测线测量记录自然电场在观测点产生的电位与无限远处（其电位记为零）的电位差，根据测量结果可以判断地下是否有矿体；根据自然电位沿测线的数值变化，还可判断地下水的水流方向：由于地下含水层的孔隙通道壁上往往吸附水中负离子，因此在水流的下游，正离子过剩，呈现较高电位。用自然电位法还可以

判断地下金属管道的位置。

二、电阻率法

电阻率法是根据矿体等目标物与周围岩石或土壤进行探测的方法。最早的电阻率法是应用于矿产资源（如石油、天然气）勘测，其基本原理如图 6－7 所示。

在图 6－7 上，通过供电电极 A 与 B 向地下输入电流强度为 I 的供电电流，在测量电极 M 与 N 上测量电流 I 在介质（地下土壤、岩石）中产生的电位差 ΔU，并按下式计算地下介质的视电阻率 ρ_a：

$$\rho_a = K(\Delta U / I)$$

式中　K——电极系系数，与 A、B、M、N 的排列及距离有关，对固定的电极排列 K 为常数；

当地下为单一的、电阻率为 ρ 的均匀、各向同性介质时，所测得的视电阻率 ρ_a 即为地下介质的电阻率 ρ。当地下为非单一、非均匀介质时，所记录的结果是与该介质的测量结果等效的、单一的、均匀各向同性介质的电阻率值，称为视电阻率，其记录点在测量电极 MN 的中点，即某次测量的结果，在空间上归位为 MN 中点附近的介质的视电阻率值。电阻率探测法按其工作方式不同又分为以下几种。

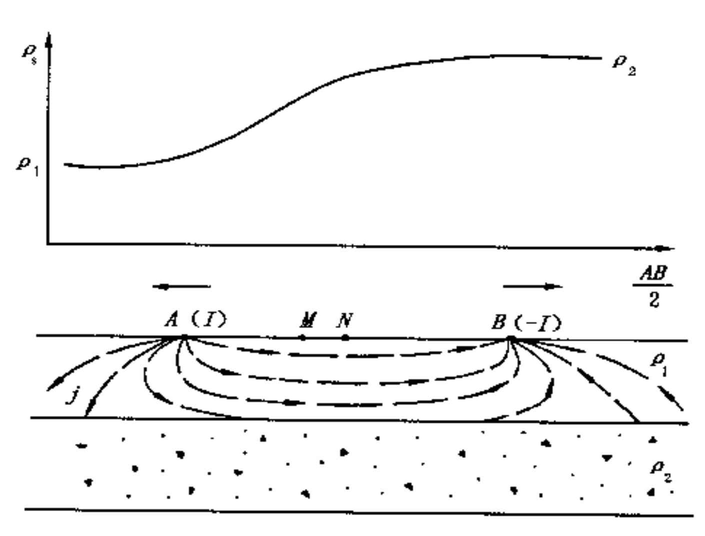


图 6－7　电阻率法勘测示意图

1. 电测剖面法

各电极的排列和距离都不改变，通常的电极系排列是以 M、N 的中点为中心，M、N 及 A、B 都对称分布（称为对称四极分布）。将这样的电极系沿测线（剖面）移动，并逐一记录视电阻率值，即可得出沿测线（剖面）方向变化的视电阻率，并可据此研究地下沿测线（剖面）方向介质电阻率的变化和查明异常体的位置。这种测量方法的特点是记录点在测量过程中是变化的，记录结果是沿某一水平方向低下介质电阻率的变化。

2. 电测深法

电测深法是在用对称四极分布的电极系测量过程中，记录点和 MN 电极的距离都不改变，但供电电极 AB 的距离则以记录点为中心向外延伸，由于供电电极间的距离在不断增大，发出的电流的分布空间或探测范围也在逐渐增大，所记录的结果反映随探测深度增大时地下介质电阻率变化的情况。是记录在地面某一固定位置处，随深度增加时地层电阻率变化的情况。

3. 中间梯度法

供电电极 AB 的距离和位置固定不动，在 A 和 B 之间移动测量电极 MN 的位置（MN 间距离不变），亦即记录点在 AB 间移动，同时记录在测量电极 MN 之间的电位差 ΔU 及供电电流 I，并根据电极系系数 K 的变化计算出相应的视电阻率，在地下有高电阻率矿体和低电阻率矿体时，由于记录到的电位差不同，所换算成的视电阻率也不同（见图 6－8），可据

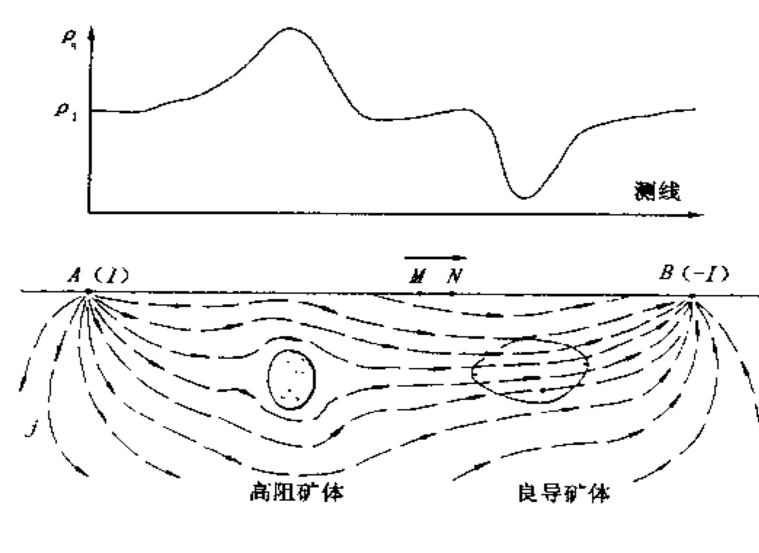


图 6-8 中间梯度法在高电阻率和低电阻率矿体上视电阻率异常示意图

此查明地下的异常体。

上述电测剖面法及中间梯度法，早期用于地下矿产资源勘探，测点的间距为几十至几百米，*AB* 电极间距离为几十米、几百米至几千米，相应的探测深度为几百米至几千米，可探测地下石油、天然气构造和其他矿体的位置和范围。为解决较小尺度的地下环境污染体的探测，以及水文、工程地质探测问题，20 世纪 80 年代以来，发展了高密度电阻率法，这种方法从观测系统来看，是将测点的间距加密到 1～10m；从测量电极系统来看，是将对称四极分布的电极系改为三电极系（即将第二个供电电极 *B* 放置到无穷远处），测量电极 *MN* 间的距离和供电电极间的距离（电极距）也明显减小。另外，为了适应高速、大量采集信号的需要，可将全部电极预先放置在设定的测点上，用多芯电缆将各电极与程控开关连接，通过微机改变电极系的排列（电极距及记录点的位置），自动进行测量。

原苏联北方某工业城市将工业污水通过两口井回灌入地面以下 40～50m 处的永冻层中，由于工业污水使地下的永冻层融化并污染地下水，影响城市供水环境。由于永冻层的电阻率和含污水的融化的水层的电阻率差异明显，因此可用电阻率法圈定污染范围。图 6-9 是污水注入地层的示意图和根据视电阻率测量结果绘制的平面等值线图。

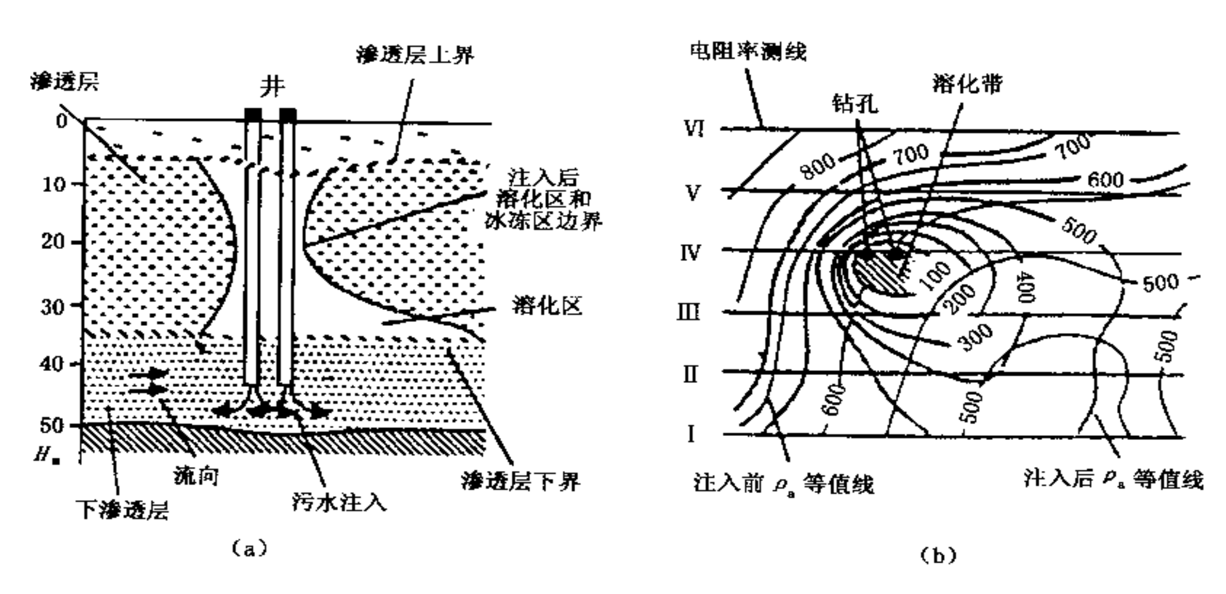


图 6-9 污水注入永冻层的断面示意图和视电阻率平面图
(a) 污水注入永冻层的断面示意图；(b) 视电阻率平面图

在我国，中国科学院在山东莱洲湾附近水域进行过视电阻率测量，以确定海水的入侵程度和计算海水的年侵入速率。根据测量结果，莱洲湾附近水域可划分为以下几种类型：海水严重入侵区（Ⅰ类区），轻度区（Ⅱ类区）和入侵影响区（Ⅲ类区），各区的特点见表 6－8。

表 6－8　莱洲湾海水入侵程度与视电阻率、水中 Cl^- 浓度的关系

入侵程度	与海水连通、扩散状况	视电阻率（ρ），Ω·m	Cl^- 浓度，mg/L
Ⅰ1	连通良好	2～5	12000～10000
Ⅰ2	连通中等	5～10	10000～5000
Ⅰ3	连通一般	10～15	5000～1500
Ⅱ1	扩散良好	15～25	1500～800
Ⅱ2	扩散中等	25～40	800～500
Ⅲ	入侵影响区	＞40	500～200

注：根据井泽升，引自《环境与地球物理》地震出版社，1997 年。

根据水域视电阻率测量和若干井中电测井资料，计算出莱洲湾地区的海水入侵速率为：1987～1988 年 32.4km^2/a；1988～1989 年 10.4km^2/a。

莱洲湾地区在 20 世纪 90 年代以后，海水入侵面积已经扩大为 435km^2，报废机井 6000 多口，使原来用地下水灌溉的 50 多万亩耕地受到影响，还使约 5 万亩耕地发生盐碱化。

三、激发极化法

由于岩石骨架颗粒表面和孔隙流体之间的电化学作用，会产生偶电层，在由电源向地下输入强度为 I 的电流的作用下，偶电层对着电流流入的一端，正电荷过剩（见本章第三节），对应于电流流出的一端，负电荷过剩。这样产生的电场叫激发极化电场。激发极化法可用任何一种对称四极的电极系进行测量。

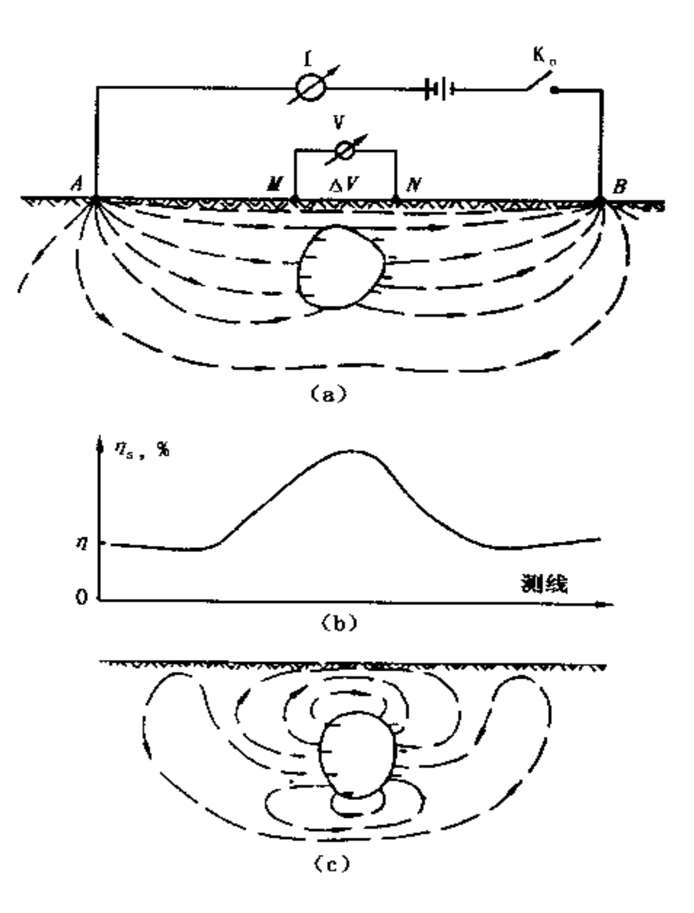


图 6－10　激发极化法原理图

在图 6－10 上，先测量供电电流在测量电极 MN 之间产生的电位差 ΔU，这一电位差实际是外加电场和激发极化电场之和（即 ΔU 为第三节中外加电场 E_1 和激发极化电场 E_2 之和），并可据此求出地下介质的视电阻率 ρ_a；然后断开供电电流，测量激发极化电场产生的电位差 ΔU_2（相当于第三节中的激发极化电场 E_2），根据测量所

得的 ΔU_2 和 ΔU，可计算地下介质的视极化率 η_a：

$$\eta_a = \Delta U_2 / \Delta U(\%)$$

当测量电极系沿测线移动时，不断的记录在各测点的视电阻率和视极化率（ρ_a，η_a），就可能判断地下介质的变化：若在测线上视电阻率和视极化率都不发生变化，说明地下介质中不存在异常体。若地下有异常体，则在记录点在其上方时，所测得的视电阻率发生改变，而且视极化率也会由于在异常体附近的电流密度改变而出现异常。

按供电方式的不同，激发极化法又有直流激发极化法和交流激发极化法两类。直流激发极化法只能记录视电阻率和视极化率两个参数。交流激发极化法则又按供电的频率和测量内容分为变频法和谱激发极化法。变频法是在超低频频段（0.01～10Hz）内选择两个频率相差较多的固定频率供电，同时测量在两种频率下的视电阻率，并在断电后测量两种视极化率。

谱激发极化法是在相当宽的频段内，分别用各种不同的频率供电，测量相应的视电阻率，并在断电后测量各种频率供电时产生的激发极化场的视极化率。国外有报道认为，用谱极化方法，即根据在不同频率供电条件下产生的激发极化电位的测量结果，可以判断地下水层的孔隙度和渗透率。

四、电磁感应法

电磁感应法的原理是用人工激发的电磁场使地下的异常体产生感应电流，测量记录该感应电流在地下产生的次生感应电场的空间和时间分布，有可能识别地下矿体或其他异常体的位置及种类。所用的人工电磁场源，则可分为连续波源、瞬变脉冲源等，因此相应的有连续波电磁感应法和瞬变脉冲电磁感应法等。

1．连续波电磁感应法

连续波电磁感应法是向地下发射连续的电磁波，同时观测地下介质中产生的感应电流所激发的次生感应电场的时间和空间分布。也可以改变向地下发射的连续电磁波的频率，测量记录地下介质中次生感应电场随频率变化的规律。这种方法也叫频域电磁感应法，所用电磁波的频率在 100kHz 以下。

2．频率域电磁感应法

频率域电磁感应法是在地面上，间隔 50～250m 放置发射和接收线圈，在发射线圈中逐次发射频率在 0.8～7kHz 范围内的若干个频率的电磁波，在接收线圈中测量记录发射线圈产生的一次场和一次场在地下介质中产生的感应电流生成的二次场的总和（矢量和）。由于地下介质非纯电阻性，因此二次场和一次场间有相位差，因而所记录的总场矢量可用复数表示，其实部和虚部都用一次场归一化。由于电磁波的探测深度与电磁波频率以及地下介质的电导率有关，因此选用不同的频率可测量到不同深度处地下介质的变化。为了保证足够的探测深度，发射电磁波的频率一般不低于 100Hz。通常，频率为 0.8～7kHz 时，能有较适中的探测深度。

频率域电磁感应法中，发射和接收线圈距离较小时，所接收的总场中，一次场所占比例大；当发射和接收线圈距离增加时，接收记录的总场中，二次场的比例增加。

频率域电磁感应法适用于查明地下存在的横向不均匀的异常体，如埋在地下的垃圾、废石堆，被污染的地下水等，也能查明地下的裂缝、断层等。

3．时间域电磁感应法

时间域电磁感应法是向地下发射脉冲磁场（一次场），在一次场消失后，用接收线圈或

接地电极测量接收地下介质中产生的随时间变化的二次场（涡流场或称傅科电流场），通常只测量记录二次场的磁分量。由于这种方法测量记录的仅是二次场，因此对地下容易产生涡流场的导电异常体敏感，对地下电导率不同的介质分辨能力较强；可通过多次脉冲激发，二次场的重复测量及叠加处理等技术，能够提高信噪比；由于这种方法只测量记录二次场的磁分量，因此测量结果受地面电性不均匀的干扰小。但这种方法仪器及解释处理较复杂。

4．甚低频法

甚低频（VLF）法是利用固定在全球的几十个长波电台（这些电台的作用是为在远离本土的潜艇导航或进行长波通信，部分长波电台的地点、发射电磁波的频率及总功率见表 6－9）发出的电磁波信号作为场源，在地表附近测量记录长波电台发出的信号在地下介质产生的一次场和二次场。

表 6－9　部分长波电台（VLF 台站）的地点、发射电磁波的频率和功率

台站名	地点	频率，kHz	功率，kW	
FUO	法国，波尔多	15.1	500	
GBR	英国，拉格比	16.0	750	
IVC	意大利，塔沃拉腊	20.3	500	
UMS	俄罗斯，莫斯科	17.1	1000	我国西北可利用
NAA	美国，卡特勒（缅因州）	17.8	1000	
NKL	美国，西雅图	18.6	300	
NWC	澳大利亚，西北角	22.3	1000	我国可利用
NDT	日本，爱知县	17.4	500	我国可利用

注：引自崔霖沛等：《环境地球物理方法及应用》，地质出版社，1997。

由于甚低频法不需要发射设备，因此装置轻便，效率高，成本低。但是由于使用的是频率为 15～25kHz 频段的信号，因此探测深度浅，根据计算，在电阻率为 30Ω·m 的地层（含粘土层）中，探测深度不超过 15m。另外接收信号受地形和甚低频信号日变化的影响明显。

在远离电台的地区，由电台发射的电磁波可视为平面波，当地下有导电的异常体时，将在异常体中感应出涡流，可测量记录到涡流产生的二次场，由于异常体的大小以及分布方向与电磁波传播方向的不同，所测量记录到的总场、电场的水平分量、磁场的水平和垂直分量等参数也会有差异，可用反演方法根据测量记录到的上述参数解释判断地下矿体或异常体的位置和性质，除了可用于定性查明导电矿体范围、岩溶发育层段外，还可确定地下埋藏的污染物的大致位置以及沿海岸线的海水和淡水的界面。

在对甚低频法测量记录资料进行反演时，要考虑对所观测的甚低频电磁波的日变化、短周期变化、地形变化进行校正。

五、地质雷达

地质雷达或称探地雷达（Ground Penetrating Radar，简称 GPR）是利用频率为 1MHz～1GHz 的高频电磁波在地下的反射波束探测地下矿体或其他异常体的位置、分布和特征的方法。在这一频段的电磁波，在地下表现明显的波动特征，因此可以根据其反射、折射等过程来实现对地下异常体的探测。

地质雷达在地面通过发射天线 T 将电磁波以宽频带短脉冲的形式输入地下，再由接收天线 R 接收反射波信号。地质雷达的原理图见图 6－11。

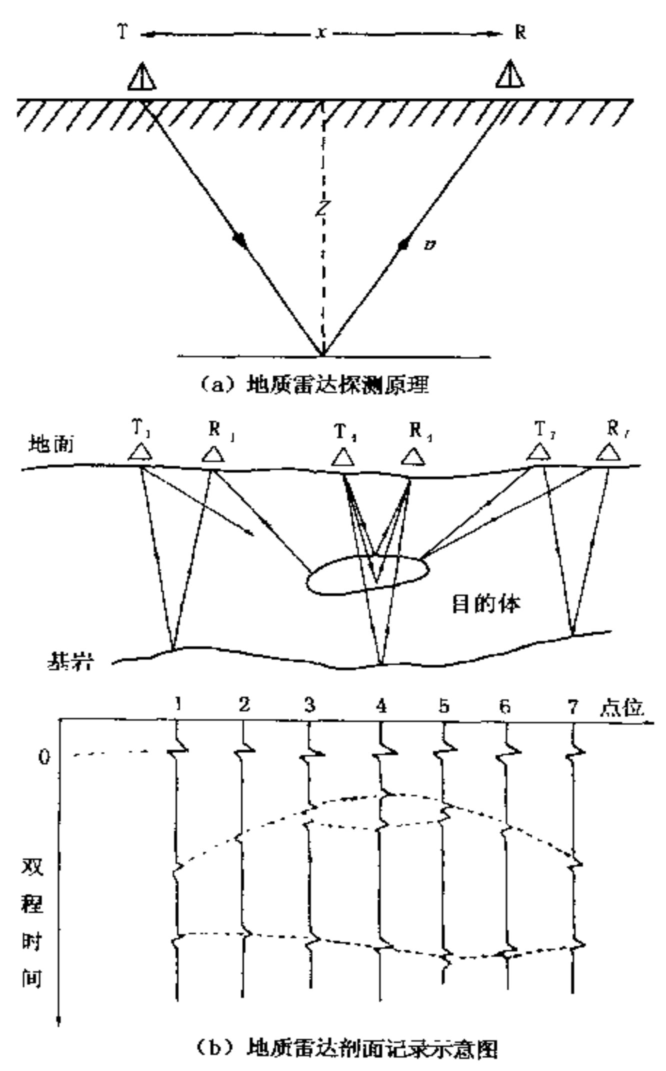


图 6－11　地质雷达原理及探测示意图

(a) 地质雷达探测原理；(b) 地质雷达剖面记录示意图

在图 6－11 上，电磁波脉冲从发射天线 T 到接收天线的走时 t 为：

$$t = 2\sqrt{Z^2 + (X/2)^2}/v = \sqrt{4Z^2 + X^2}/v$$

式中　v——电磁波在地下介质中的传播速度。

对一般非磁性、非导电介质，$v = C/\sqrt{\varepsilon_r}$（$C$ 为真空中电磁波传播速度 $C =$ 30cm/ns，ε_r 为地下介质的相对介电常数，其及电磁波在其中的传播速度数值见表 6－8）。在测量记录电磁波反射脉冲的走时 t 并视地下介质的传播速度 v 为已知时，可计算出地下反射界面的深度 Z。

所测量记录的脉冲反射波的幅度取决于发射天线的输出能量、电磁波在地下介质时的衰减、反射界面距地表的距离等因素。电磁波在地下介质中的衰减还与电磁波的频率、地下介质的电阻率（或电导率）等因素有关。高频电磁波在地层中的衰减明显；在电阻率低（电导率高）的介质中电磁波衰减明显。部分常见介质的电导率、相对介电常数、电磁波传播速度和衰减系数见表 6－10。由于电阻率低的介质对电磁波衰减明显，因此，地质雷达不适宜在电阻率低于 100Ω·m 的介质中工作。在地下含水率较高的岩石和土壤中，地质雷达的探测深度有限。对于中心频率为 100MHz 的地质雷达，在含水率低的坚硬岩石层中，可探测深度约 50m 的异常体，而在含水率较高的土壤和岩石中探测深度仅 10m 左右。

表 6－10　常见介质的电磁波传播参数

介　质	电导率 σ，S/m	相对介电常数 ε	传播速度 v，cm/ns	衰减系数，dB/m
空气	0	1	30	0
纯水	$10^{-4} \sim 10^{-2}$	81	3.3～3.4	0.1
海水	1～10	81	3.3～3.4	1000
冰		3.2	17	0.01

续表

介质	电导率 σ，S/m	相对介电常数 ε	传播速度 v，cm/ns	衰减系数，dB/m
干砂	$10^{-7}\sim10^{-3}$	4～6	15	0.01
湿砂	$10^{-4}\sim10^{-2}$	25～30	6	0.03～0.3
粘土	$10^{-1}\sim1$	5～40	4.7～13	1～300
泥炭		6～80	3.4～3.9	0.3
土壤	$1.4\times10^{-4}\sim5.0\times10^{-2}$	2.6～15	13～17	20～30
石灰岩（干）	10^{-9}	7	11	0.4～1.0
石灰岩（湿）	2.5×10^{-2}	8		0.4～1.0
花岗岩（干）	10^{-8}	5	15	0.01～1
花岗岩（湿）	10^{-3}	7	10	0.01～1
混凝土		6.4	12	
沥青		3～5	12～18	

注：摘引自崔霖沛等：《环境地球物理方法及应用》，地质出版社，1997。

表 6－11　地质雷达在不同介质中的探测深度

介质	探测深度，m	介质	探测深度，m
极地冰层	>4000	干砂	>60
岩盐（无水）	>2000	盐水	<1
温带冰	600	湿粘土	<2
花岗岩	300	破碎花岗岩	30

注：引自崔霖沛等：《环境地球物理方法及应用》，地质出版社，1997。

地质雷达用高频电磁波进行地下探测，虽然探测深度通常仅几十米，但其分辨率高，甚至可达厘米级。另外地质雷达还可在井下进行测量记录，这种方法叫钻孔地质雷达，可在单井中测量记录井壁外介质的反射波信号，也可在井间（跨孔）进行测量，即在一口井内发射电磁波，而在另外的一口或多口井中测量记录，以查明井间的异常体，所得的结果还可按成像技术（CT）处理，得出井间介质分布的图像。

地质雷达除了能勘测地下浅部的矿体外，还能用于工程勘测，如检测地下铁道的坑道附近是否有松动圈，水库的坝基的岩体是否完整，江河或海岸堤坝是否存在管涌、孔洞等隐患；能评价江河护岸工程的施工质量；还能检查地下管线的走向和位置。近年来，用地质雷达对垃圾填埋场附近进行探测，以对垃圾的污染进行评价的方法受到关注。所进行的工作表明，在垃圾填埋场附近，由于垃圾的电导率通常高于正常的土壤和岩层，因此在填埋场附近接收到的电磁波的幅度由于高电导率（低电阻率）垃圾或渗出物衰减而明显变小；另外，垃圾中往往有零星的金属或其他导电物，会使所记录的测量结果上有许多点状物形成的反射信号，而且由于垃圾的成分复杂，分布零乱，因此与没有垃圾填埋的背景值区相比，在垃圾填埋场附近，地质雷达接收到的反射波凌乱无序，与正常土壤、岩层上方有规律的连续反射波有明显差别。

六、其他电磁探测方法

除了上述用人工电磁源的各种方法外，还有测量记录天然电磁场的探测方法，即大地电磁法（MT）和音频大地电磁法（AMT）。大地电磁法测量记录与太阳辐射有关的超低频大地电磁场，其频段为 $10^{-4}\sim10^{-2}$Hz。音频大地电磁法主要观测大气层雷电过程中产生的频段为 $10^{-1}\sim10^{3}$Hz 的电磁场。

与岩石的声发射现象类似，在岩石受力变形发生破裂前，既发射出声波信号，也发射出电磁波信号。所发射的电磁波信号的频带很宽，而且幅度变化也十分明显。有研究认为，对这种电磁辐射的测量记录可直接监测岩石破裂过程，有助于预测滑坡、泥石流，甚至有助于地震预测。

小　　结

大气中的电离层、海水中的电解质、雷电、太阳磁暴等这些都是自然界中的电学现象或存在。随着移动通信的快速发展，电磁辐射污染越来越被人们所关注。在地球物理研究中已发展了多种电学或电磁探测方法，这些电学或电磁探测方法可以用于环境地球物理领域的研究。

思考题

（1）自然界中存在哪些电学现象？

（2）你知道电学方法在环境地球物理研究中的应用有哪些？

第七章　环境地球物理中的声学问题

本章讨论在大气圈、水圈和岩石圈的声学性质和简要说明声波在空气、海水和地壳岩石中传播的规律和特征；介绍有关生态环境问题中的声学方法。

声波是在介质中传播的一定频率的弹性振动（或机械振动）。声波在介质中传播时，质点的位移方向与声波传播方向一致的波称为纵波，通常用符号 P 表示。纵波能在气体、液体和固体介质中传播。质点位移方向与波的传播方向垂直的波称为横波，用符号 S 表示。横波只能在固体中传播。描述声波在介质中传播的基本物理量有：

频率：单位时间（s）中声波的振动次数，记为为 f，单位是 Hz。

周期：声波振动一次所用的时间，记为 T，单位为 s，周期是频率的倒数 $T=1/f$。

振幅：声波传播过程中，介质的密度、压力、质点运动等物理量偏离其平均值的最大量值（单位为原物理量的单位）。

速度：声波在介质中的传播速度，这一速度是也是弹性波能量在介质中的传播速度，记为 v，单位为：m/s 或 km/s。声波传播速度主要取决于介质的密度和弹性参数，由于介质的密度和弹性参数与温度和压力有关，因此介质中的声波速度也与温度、压力有关。

波长：声波在介质中传播时，相位相同的两点的距离，记为 λ，单位为长度单位 m、cm、mm 等。波长与频率和速度的关系为：$\lambda=v/f$。

描述介质中声波波场的物理量还有声压 p、声功率 W（在第二章第七节中已有说明，此处不再重复），介质的密度（记为 ρ）和声波传播速度 v 的乘积为声阻抗记为 Z，即 $Z=\rho\cdot v$。

声波传播到两种不同介质的分界面，由于声波速度的突变，其传播路径也发生改变：一部分声波返回原介质，产生反射；另一部分声波则改变原来传播方向，进入另外一种介质，产生折射（或透射）。若声波在第一种和第二种介质中的速度是 v_1 和 v_2，则入射角 θ_1、反射角 θ_1'和折射角 θ_2 间的关系满足 Snell 定律：$v_1/\sin\theta_1=v_1/\sin\theta_1'=v_2/\sin\theta_2$。

声波作为一种波动，在其传播路径上遇到障碍物时，如果障碍物的几何尺寸比声波波长大很多时，声波发生反射，若障碍物的几何形状不规则，则反射出去的声波方向各不相同，沿障碍物边界散开，即发生"漫反射"。此外，还有一部分声波"绕"过障碍物，在其后的"影区"传播，在这种现象叫绕射或衍射。若障碍物的几何尺寸比声波波长小很多，此时只在障碍物附近发生漫反射。在声波波长远大于障碍物尺寸时，声波在障碍物附近明显改变传播方向，发生瑞利散射，此时声波在原来传播方向上的衰减与声波信号频率的 4 次方成正比。若声波波长和障碍物的几何尺寸接近，则在障碍物附近，反射波和衍射波会由于波的叠加发生各种干涉。

声波在传播过程中，还会由于随传播距离增加，波阵面发生几何扩展而导致能量分散，这种在传播过程中声波信号的减弱与介质的物理性质无关，也不涉及能量转换，叫做几何衰减。另外声波在介质中传播时，由于介质在传播声波过程中产生的"内摩擦"、"粘滞"、热传导等过程，对声波能量的吸收，致使声波能量减少，这种过程涉及能量转换，即部分声波能量由于克服介质中的摩擦、粘滞，以及相邻体积元间的热传导消耗，变成热能。这种衰减

称为物理衰减或经典吸收（衰减）。

声波在介质中衰减的另外一种机制是分子弛豫吸收，对分子弛豫吸收的物理过程可简述如下：介质中的多原子分子有三种运动自由度，即平动（外自由度）、转动和振动（均为外自由度）。在分子内，内、外自由度是平衡的，介质处于平衡状态。在声波通过介质时，介质中分子的平衡状态发生改变，其内、外自由度的能量将重新分配，向新的平衡状态过渡。从原有的平衡状态向新的平衡状态过渡的不可逆过程称为弛豫过程，建立新的平衡过程所需的时间称为弛豫时间，记为 τ。在弛豫过程中，有序的声能将不可逆的转换为无序的热能，即发生声能的耗散过程。这一耗散过程和弛豫时间有关，也和声波的频率有关。亦即某些介质或某些分子团对某种特征频率的声波有明显的吸收；而对于频率极高的声波，其周期可能极短，以致比介质的弛豫时间还小很多，此时在介质中传播的声波来不及建立弛豫过程，因此也就不发生弛豫吸收。各种频率的声波在介质中传播时，由于介质的分子团的几何尺寸和排列等原因，在介质中的某些方向上（或在固定的方向上），某种特征频率的声波速度或声衰减会呈现极值，也就是说，声波的速度和衰减会因其频率不同而异，这种现象称为声频散，在非均匀介质中，声波传播过程的频散是不容忽视的问题。

第一节　大气圈的声学性质和大气层中的主要声学现象

一、大气的主要声学参数

大气（或气体）的声学性质与大气的密度、压力、温度、比热、粘滞系数有关。大气的声学参数主要是指声速和声衰减。

1. *大气的声速*

大气中只传播纵波，其速度为：

$$v_p = \sqrt{\gamma p/\rho}$$

式中　p——大气压力，在海平面上，温度 $T=15℃$ 时，$p=1.01\times10^5 N/m^2$；

ρ——大气密度，在海平面上，温度 $T=15℃$ 时，$\rho=1.225 kg/m^3$；

γ——大气的定压比热 C_p 与定容比热 C_u 的比值（比热比），在海平面上 $\gamma=1.403$。

通常，大气中的声波速度 $v_p=340 m/s$。

由于大气圈中的温度、压力和水蒸气的分布是不均匀和变化的，因此在大气圈中，速度的分布是随纬度、高度、季节而变化的。图 7-1 是 N41°W74°（美国纽约附近）大气圈声速剖面。从图 7-1 可见，在对流层中，夏季声速略高于冬季，而且随高度增加，声速大体上是降低的。在平流层中，随高度增加，声速在夏季是升高的。

2. *大气中的声衰减*

本章在前面已经提到，声波在介质中的吸收（衰减）可视为经典吸收（粘滞、内摩擦和传导引起的吸收）和分子弛豫吸收两类。在大气中，声波的吸收可分为二部分：经典吸收、分子转动引起的吸收以及大气中主要成分 O_2 和 N_2 的分子振动吸收，即吸收系数：

$$\alpha = \alpha_{经典} + \alpha_{转动} + \alpha_{振动}(O_2) + \alpha_{振动}(N_2)$$

对前两项之和，Sutherlandl 在 1975 年提出以下经验公式：

$$\alpha_{经典} + \alpha_{转动} = 5.847\times10^{-10}[(p_0/p)/(T_0/T) + 2.654]f_2(dB/m)$$

式中　p——压力（p_0 为大气压，$p_0=101386 N/m^2$）；

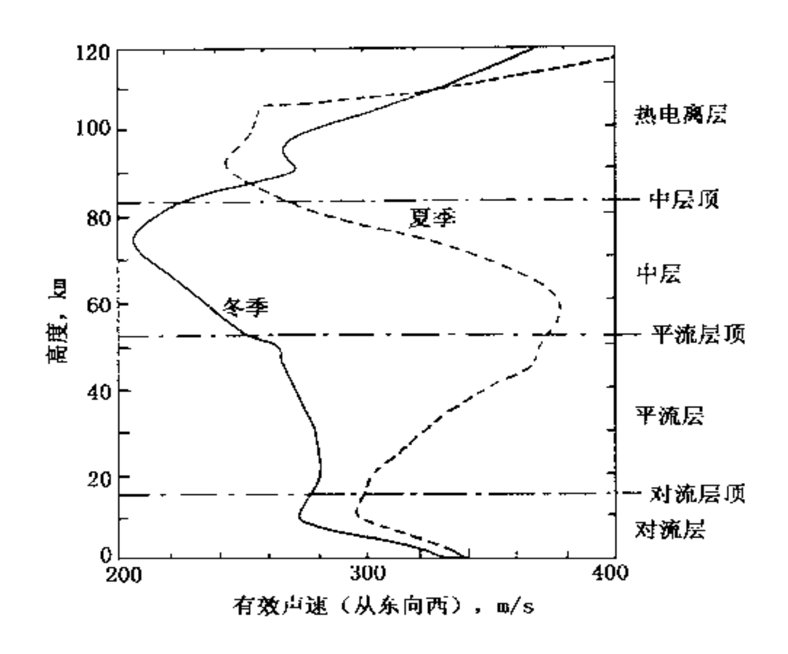


图 7－1　大气圈的声速剖面

T——绝对温度（$T_0=293K$，即 20℃时）；

f——声波频率。

对于经典吸收和振动吸收，吸收系数都和频率的平方（f^2）成正比，在 0℃及 1 个大气压时，由于经典吸收和大气分子转动吸收产生的吸收系数约为 $1.6\times10^{-7}f^2$（dB/km）。

对于振动引起的衰减，每个波长（作为单位距离）的吸收系数为：

$$\alpha = \alpha_{max}[(2f/f_c)/(1+f/f_c)] \quad (dB)$$

式中　f_c——弛豫吸收共振频率，$f_c(O_2)=12500Hz$，$f_c(N_2)=173Hz$。

α_{max}——在弛豫吸收共振频率时的吸收系数。

f_c 与大气的温度和湿度有关，而 α_{max} 仅与温度有关。研究表明，大气中声波的吸收主要取决于 O_2 的弛豫吸收，在大气中含量最多的 N_2 只在低频时对吸收的贡献才明显。图 7－2为大气的声吸收系数与频率的关系。

3．大气中的声散射

大气中的空气质点处于无规则运动，即大气的温度、湿度和空气质点运动速度（风速）的时间、空间分布无规则的脉动，这就是所谓“湍流”。由于大气的湍流，因此在大气中传播的的速度也会在小尺度上产生随时间和空间的脉动，这样就产生了大气中声波波阵面的无规则畸变。由于这些畸变的波阵面的相干效应（不同相位波的叠加），使一部分声波偏离原来的传播方向，这就是声波在大气湍流中的散射。散射的强度和方向与大气湍流的强度和频率特征有关。在大气中存在雨、雾时，各种不同尺度的液滴也对声波发生散射，即声波在有雨、雾的大气中的衰减会因为散射而增加。这种广义的散射也还包括一部分弛豫吸收，因此也和声波的频率有关。在低频频段，当声波频率低于或接近雾滴或大气中水蒸气中的弛豫频率（由于能量转换等过程达到新平衡的频率）时，声衰减系数增加；当声波频率高于弛豫频率时，由于声波在介质中传播的周期小于大气中雾滴或水蒸气的弛豫周期，声波的传播来不

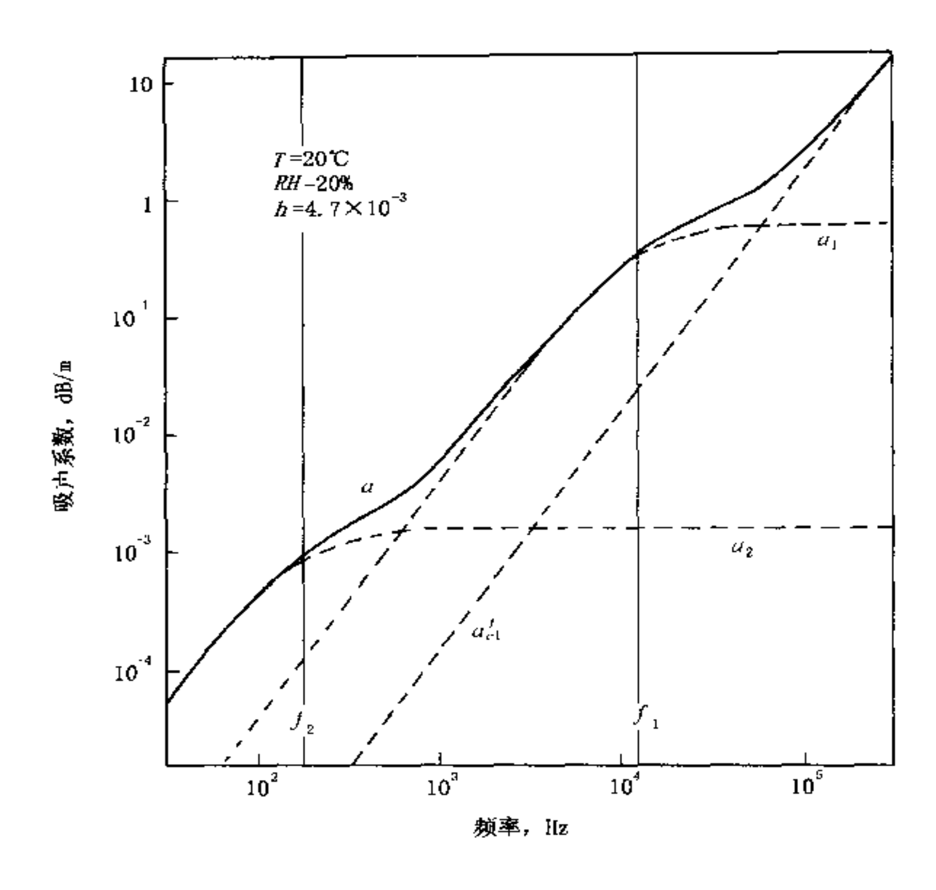


图 7－2　大气的声吸收系数与频率的关系

（温度 20℃，1 个大气压，相对湿度为 20%）

α_1—O_2 对吸收的贡献；α_2—N_2 对吸收的贡献；

α'_{cl}—（经典吸收＋转动吸收）的贡献；α—总的吸收系数

及建立弛豫过程，因此声衰减系数降低。

二、大气中的声源

大气中的声源包括自然声源和人工声源。自然声源包括雷声、强风暴系统中大气运动引起的湍流发声和空气对流产生的声波，此类声源属于纯粹的自然声源。另外，流星穿过大气圈产生的声波，海浪和地震诱发的声波，风和地面障碍物摩擦产生的声波，也是大气中的声源，习惯上称为非纯粹大气发声。

大气中自然声源发出的声波的频度很宽，高频端可达 100～1000Hz（如雷声的高频端）。其低频端的周期则可达几十分钟，这类频率极低的声波习惯上称为次声波。大气中自然声源发出的声波主要是次声波，但由于其产生的随机性和追踪、测量的困难，对其频谱只能进行估计，研究较多的是雷声。

1. 雷声

雷声按其持续时间大体上分为三类，即：

（1）炸雷（clap）：持续时间 1s 左右的强雷声脉冲；

（2）闷雷（peal）：重复数次的隆隆声脉冲；

（3）拉磨雷（rumble）：持续时间较长的低沉声响。

雷声的频谱峰值约为 4～125Hz，有的雷声的频谱峰值在次声频段内（频率低于 20Hz，周期大于 0.05s）。

2. 轰声

航空器在超声速飞行时，其头部挤压空气，产生冲击波；同时航空器尾部由于被头部推开的空气重新汇合，也产生冲击波，这种冲击波传播到地面，就形成可听到巨响般的轰声。其基频取决于航空器尺寸，约为 1～10Hz，但其倍频丰富，在航空器的航线下形成一个地面的轰声污染区，其宽度约 80～100km，长度为起飞机场航向后方 160km 到降落机场航行方向前方 160km 处。这种突然的轰声会干扰人的正常活动，甚至会使地面建筑物发生破坏，如门、窗玻璃破碎。

3. 大气圈的次声波

大气圈中的次声波包括：

微压波。在海上风暴地区的海浪与空气作用产生的、周期为 5～7s、振幅小于 0.1P 的波，这种波通常持续几小时至数天，因为与地震波的微震波的波形相似而得名。

强风暴的次声波。其来源是强风暴区的某个小范围的活动中心，其产生机制可能是：强湍流活动产生；闪电时的雷声经长距离传播后，声频谱峰值区从高频端向低频端移动演化而生；对流层顶部的对流活动造成的大气扰动。这些次声波周期为数秒（s）至 5min（典型的是 12s～1min），振幅约 0.05～0.3Pa（通常小于 0.1Pa）。持续时间为数分钟至数小时（平均持续时间 2h）。

火山爆发和流星引起的次声波。火山爆发产生的次声波的周期为 1～300s，振幅一般为 0.1～30P，最大可达 6700P（如 1883 年夏季，印度尼西亚的喀拉喀托火山大爆发，在世界各地都曾记录到火山爆发产生的次声波引起的气压计的波动），有资料表明，在距离火山 5000km 处都可用人耳听到火山爆发的声响。

地震产生的次声波。地震发生时，由于地表的脉动，可产生周期为 12～25s 的次声波，其振幅可达 0.1～0.2Pa，持续时间约 1h。

日蚀时发生的次声波。日蚀时月影区局部大气温度下降，可产生周期为 600～1800s 的次声波，其振幅可达 3～10Pa，持续时间达数小时。

人工源的次声波主要是机械和交通工具产生的次声波频段的噪声，另外某些突发事件也产生次声波，例如核爆炸和空难事故。其中最典型的是 1986 年 1 月 28 日，美国“发现者”号航天飞机在升空后 75s，离地约 15km 处突然发生爆炸，其爆炸的高度和爆炸释放的能量都是无先例的（有人估计其爆炸当量约 10^7t TNT），在这次爆炸后 13～14h，北京和贵阳的地面次声波台站恰逢开机，所以接收到次声波波列，这是世界上对这次事件的唯一的记录。

次声波在大气圈中的传播与其频率有关，波动的频率越低，在大气中的衰减越小，传播距离越远。在频率一定时，波动的振幅越大，其传播距离越远。有研究表明，强风暴产生的次声波可传播几千千米。

由于次声波的频段和人日常活动（举手、投足）的频率接近，此外人的内脏器官的固有频率多在次声波频段，例如多数人心脏的频率为 1～2Hz。次声波在与内脏器官的固有频率相同时会发生共振，因而使内脏器官发生伤害。有研究认为，人体晕动病（晕车、晕船、晕飞机等）的主要原因是受到次声波的作用。

对人类活动影响最大的次声波是所谓“山背风”，这是一种由于地形变化引起的自然源次声波，即当与地面平行的气流遇到隆起的山包等障碍物时，气流会随地形起伏形成涡旋并

发展为震荡强烈的"晴空湍流"，即山背风。山背风的周期为 20～70s，振幅可达 0.05～0.3Pa，持续时间为数小时至数天，风速可达 340m/s。这种大气的波动对飞机和其他航空器的威胁极大，世界上不少山区多次发生空难，山背风的威胁不无关系。明显的例证是美国科罗拉多州境内的洛矶山山脉是发生山背风的典型山区，该州首府丹佛的国际机场附近发生过多次空难，后来美国的国家大气研究中心（NCAR）在机场附近建立了用多普勒雷达 CP－2 进行监听的次声波观测站，进行山背风的预警，从此后该机场杜绝了空难事故。

三、大气圈中的环境声学问题

大气作为声波传播的介质，除了传播方向会发生反射、折射，声波幅度会随波阵面的扩展会发生几何衰减，以及会由于内摩擦、粘滞、和分子弛豫等物理吸收外，还有一些与大气圈中的物理过程有关的声学问题，这些问题概括起来是两方面：第一，低层大气中的可听声的传播问题；第二，高层大气中的次声波传播问题，以下对这些问题进行讨论。

1. 低层大气中的可听声传播问题

影响低层大气中可听声的传播主要因素是大气中的某些"微观"结构和过程对声波传播的影响。大气对声波的吸收与大气的温度、湿度、压力有关，还和声波的频率有关。一般来说，温度和湿度增加会使大气对声波的衰减系数变小。在可听声频段，雾滴和水蒸气中的各种能量转换弛豫过程的频率如与声波频率接近，则声衰减略有增加。但在有雾时大气的温度比较稳定，由于温度差异产生湍流而导致的声衰减减小，因此综合大气中温度、湿度和风速等各种因素对声衰减的影响其实并不大。实验观测结果认为，由于雨、雾、雪的影响引起的声衰减的改变不超过 0.5dB/100m。

由于大气的温度随高度变化引起的声速的变化，其要点是，声波的速度与大气温度的平方根成正比；如果不考虑沿水平方向的温度变化，若大气的温度随高度的增加递减（如白天晴天时），同时声波速度随高度增加而降低，因此，除了垂直向上传播的声波外声线向上弯曲；若大气温度随高度增加而增大（如晴天的夜晚），同时声波速度随高度增加也增大，此时除了垂直向上传播的声波外，声线向下弯曲。

在地面上，在 30～70m 范围内，声波沿地面传播时，地面由于有障碍物，由其产生的温度、压力变化等因素引起的附加声衰减可忽略。在 70～700m 范围内，地面效应的声衰减的影响可用逾量声衰减来表示 A_{el}，其近似经验公式为：

$$A_{el} = (0.18\log f - 0.31)r \quad (\text{单位:dB/100m})$$

式中　f——声波的频率；

　　　r——声波的传播距离。

在厚草地和灌木林地区，频率为 1000Hz 的声波的逾量声衰减约为 23dB/100m。在没有植被覆盖的土壤上，声波沿地面传播时，由于大气和多孔的土壤的声阻抗的数量级相同，则相当一部分声波可被土壤吸收。如地面是水泥或沥青，则由于这类材料与大气在声阻抗差异明显，因而将发生反射。

一般来说，声波传播时，距离声源近的地点，接收到的声波幅度大，在可听声频段，则是离声源越近，所听到的声音越大。但也有异常的情况，其中最著名的例子是 1921 年 9 月 21 日，在德国的奥帕（Oppau），一个军火库发生爆炸，在距离奥帕约 100km 的地区，都能听到从爆炸源区直接传播来的明显的爆炸声，在 100～200km 范围内，则出现听不到爆炸的声音寂静区，但在 200km 以外，甚至在距离奥帕近 300km 的许多地区反而听到明显的爆炸声，出现了第二个可听区，这是由于向上传播的爆炸声被高层大气中存在温度较高的层段，

对声波反射的结果（逆温层反射，即前面述及的温度随高度逐渐而变大时的声线向下弯曲）。

2. 大气中次声波的传播

大气中的次声波以其频率低为重要特征。介质在传播声波时运动的加速度和声波频率的平方成正比，通常在可听声频段，所获得的加速度远大于重力加速度，因而重力加速度可忽略，因此声波和超声波以及电磁波虽然都在重力加速度无所不在的地球上传播，但重力加速度对声波、超声波、电磁波的影响是无需考虑的。但在声波的频率降低为次声波时、质点所获得的加速度降低，因而重力加速度对介质运动的规律和行为所发生的影响不再能忽略。研究表明当次声波的频率低于 0.03Hz 时，重力加速度对次声波的影响不能再忽略。

实际上，大气的密度随高度的分布受重力场的影响，是随高度增加按指数规律减小的，如果原来稳定的大气受到次声波的作用而发生波动时，其上层较轻的空气团被压向下面较重的空气中，此时使较轻的空气团恢复到原来平衡位置并因惯性超过原来平面（平衡点）的作用力实际上是两种，其一是空气作为弹性介质的压缩—膨胀恢复力；另一种是由于大气的密度分布产生的浮力（就其本质而论，源于重力）。这就是说，由于地球重力的缘故，使大气的密度在重力场方向上分布不均匀，这种密度分布的不均匀使次声波的传播增加了一种恢复力——浮力。在这种浮力的作用下。在大气层中存在一种固有震荡频率，称为浮力频率（或 Vaisala—Brunt 频率，简称 V—B 频率），这种震荡频率是高度的函数。

随次声波频率的降低，维持次声波传播过程的弹性力的作用更加减小，而浮力的作用成为主要因素。此时次声波被称为声重力波。

次声波可用精密的微压计探测，微压计可根据次声波的频率调节到一定频段，在此时记录大气压中微小的压力变化（精度达 0.001P）。为了减少风噪声的干扰，通常进行微压计的阵列观测。通过在相距几百千米的几个微压计阵列记录到的次声波信息，可追踪其声源，通常是强风暴引起的次声波波动，另外还可根据对次声波的观测记录，探测核爆炸的位置和爆炸当量。

3. 大气中的噪声传播问题

除了人类活动产生的噪声如工业噪声、交通噪声、建筑噪声、爆炸噪声及各种社会生活噪声以外，在自然界也有许多噪声源，各类噪声在大气中的传播也有一定的规律。

自然界中的噪声包括火山爆发、地震、雪崩、滑坡、雷电、陨石进入大气圈（轰声）等自然界突变现象产生的噪声，也包括瀑布、潮汐、海浪等持续的发声，另外某些动植物也会发声（如蝉鸣）。但在自然界中，最常被人听到的噪声是大气湍流或涡旋运动产生的风声。风声的频率特性与大气流动的雷诺数 R_e 有关。雷诺数是判断流体流动形态的无量纲参数，雷诺数表达式为：

$$R_e = VD/\mu(\text{无量纲})$$

式中 μ——空气的运动粘滞系数；

D——气流运动遇到的障碍物的线度；

V——气流运动速度。

当空气运动（风）遇到障碍物，会在障碍物后面产生湍流或涡旋，此时，若气流速度大，雷诺数 $R_e > 10^6$，会产生宽频带的湍流噪声；当 $300 < R_e < 10^4$ 时，产生窄频带的涡旋噪声，其频率峰值（主值）约为：

$$f = 0.2V/D$$

按此式计算，风速为 46km/h 的风吹过直径 1cm 的树枝时，产生的噪声的主频约

256Hz。若障碍物的尺寸减小，则噪声的频率明显升高。

大气中噪声传播过程中的衰减包括声波的几何扩散和物理吸收。在距离声源较近处，声波的衰减主要由几何扩散引起，声压与传播距离的平方成反比，离声源距离增加1倍，声压级降低6dB。在离声源较远处，声波可视为平面波，其几何扩散已经很小，声波衰减的原因主要是物理吸收。如果在距声源 R_o 处的声压级为 L_o，则在距离为 R 处的声压级 L_p 为：

$$L_p = L_o - 20\lg(R/R_o) - \alpha(R - R_o)$$

式中 α——空气的声衰减常数。

空气的声衰减常数与空气的温度、湿度有关，也与声波的频率有关。随频率增加，声衰减常数增大；随湿度增加，声衰减常数减小；在温度为20℃以下时，随温度增加，声衰减常数增大，对温度超过20℃时，随温度增加声衰减常数减小。

自然界还有一些动物会发出声音，如食虫蝙蝠发出的声音多在超声频段（10～100kHz），在嘴的前方10cm处的声压级可达100～114dB。昆虫在飞行时翅膀扑打空气，发出在可听声范围内的声波，令人厌烦。表7－1是一些昆虫在飞行时发出声音的频率。

表7－1 一些昆虫在飞行时发出声音的频率

昆虫名称	蜜蜂	胡蜂	家蝇	摇蚊	金龟子	夜蛾
频率，Hz	250	165	150～200	440～500	58	46

蚊虫等发出的噪声虽然微弱，但十分令人厌烦。有研究认为，用人工源发出与昆虫飞行时产生的声波频率接近声波，有驱赶昆虫（如蚊虫叮咬）的效果。

第二节 海洋和水的声学性质和声传播问题

对水，尤其是海水声学性质的研究源于19世纪初期。1826年瑞士科学家科拉顿在日内瓦湖中进行过湖水声速的测量，测得水的声速为1435m/s，已经很接近现代科学的测量结果。1912年英国豪华邮轮《泰坦尼克号》在北大西洋与冰山相撞沉没，成为有史以来最大的海难事故。从此，探测海水下的冰山成为科学家关注的问题。当时无线电定位技术已经相当发展，但在海水中电磁波被强烈吸收，无法在水下进行探测，因此想到了能在水中传播的声波。此后，费森登（Fessenden，1914）发明电动式水声换能器，在海水下测定了约3.7km（2n mile）以外冰山。稍后，郎之万（Langevin，1918）用压电效应换能器发出的超声波测定了水下潜艇的位置，研制成功早期的"声纳"，开创了现代的水声学。

一、水的声速

水的声速与水的密度、体积压缩模量、温度和压力有关，在温度、压力不变的条件下，水的声速 v 可表示为：

$$v = \sqrt{K/\rho}$$

式中 K——水的体积压缩模量；

ρ——水的密度。

在温度升高时，由于水的体积模量增加，因此其声速增大，例如，在常压（1atm[1]）

[1] 1atm＝101325Pa。

下，0℃时水的声速为 1402m/s，20℃时为 1482m/s，40℃时为 1528m/s。随压力增加，水的声速也增大，在温度为 30.68℃和压力为 1atm 时，水的声速为 1510m/s，当压力增加到 98.7atm 时，声速增大到 1527m/s，压力为 592.2atm 时，声速为 1611m/s。

在海水中，声速还和盐度有关。海水的声速与温度、盐度、压力的关系的经验公式是：

$$v = 1449.2 + 4.6T + 0.557T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.01T)(s - 35) + 1.58 \times 10^{-6}p$$

式中　T——海水温度，℃；

s——海水盐度，‰；

p——海水静压力（$p_a = N/m^2$）。

除了在河口和海流汇合处及某些特定特殊海域，海水的盐度变化并不大，因此，海水的声速主要取决于温度和压力。在波斯湾海水温度可达 36℃，而在北冰洋，海水温度仅 −2℃。在海面附近（1atm），0℃时，盐度为 33‰，海水声速为 1446m/s（淡水为 1402m/s）；在 30℃时，盐度为 33‰的海水声速为 1544m/s（淡水为 1509m/s）。在海水的温度为 0℃、盐度 33‰的不变条件下，在海平面附近（压力为 1atm）海水声速为 1446m/s，在 1km 深处（压力为 100atm），海水声速增加为 1462m/s，在 5km 深处（压力为 500atm），海水声速又增加到 1529m/s。在世界的各海洋中，浅层海水的声速主要取决于温度和盐度的变化，在深层海水中，温度和盐度变化很小，声速主要取决于深度或压力。

二、水中的声衰减

在任何介质中，平面声波的声压 p 随传播距离 dx 增加而减小，声压的变化：

$$dp = -p_o \alpha dx$$

对此式积分，有

$$p = p_o e^{-\alpha x}$$

式中　p_o——传播距离为零时的声压；

α——介质的声衰减系数。

只要在距离声源分别为 x_1 和 x_2 的两点测量声压 p_1 和 p_2，即可求出声衰减系数：

$$\alpha = \ln(p_1/p_2)/(x_2 - x_1)$$

在海水中，引起声衰减的原因有二：一是水的粘滞衰减（包括切变粘滞和体积粘滞）；二是在海水中，引起声衰减的原因有二：一是水的粘滞衰减（包括切变粘滞和体积粘滞）；二是海水中硫酸镁（$MgSO_4$）的弛豫衰减。

粘滞衰减系数为：

$$\alpha = [16\pi^2 f^{2/3} \rho v^3] \cdot (\mu_s + 3/4\mu_v)$$

式中　f——声波的频率；

v——水的声速；

ρ——水的密度；

μ_s，μ_v——水的切变粘滞系数和体积粘滞系数，对纯水，$\mu_v/\mu_s = 2.81$。

在纯水中，由于各种粘滞产生的声衰减系数 $\alpha = 20.6 \times (10)^{-12} f^2$（dB/m）。

在声波的频率低于 100kHz 时，海水中硫酸镁离子的弛豫过程是声波衰减的主要因素；在声波频率低于 1kHz 时硼酸［B（OH）$_3$］的弛豫是声衰减的主要因素。即在一定频率的声压作用下，硫酸镁或硼酸的分子会发生分解和缔合过程，并在这一过程中消耗声波能量，这就是声波在海水中的弛豫衰减过程。综合粘滞和弛豫两种过程，在海水中的声衰减系数的经

验值为：

$$\alpha = 0.00203[Sf_t f^2/(f_t^2 + f^2)] + 0.0000293(f^2/f_t^2)$$

式中　S——海水的盐度，‰；

f_t——硫酸镁离子的弛豫频率，其数值与绝对温度 T 有关。

$$f_t = 21.9 \times 10^{(6-1520/T)}(\mathrm{dB/m})$$

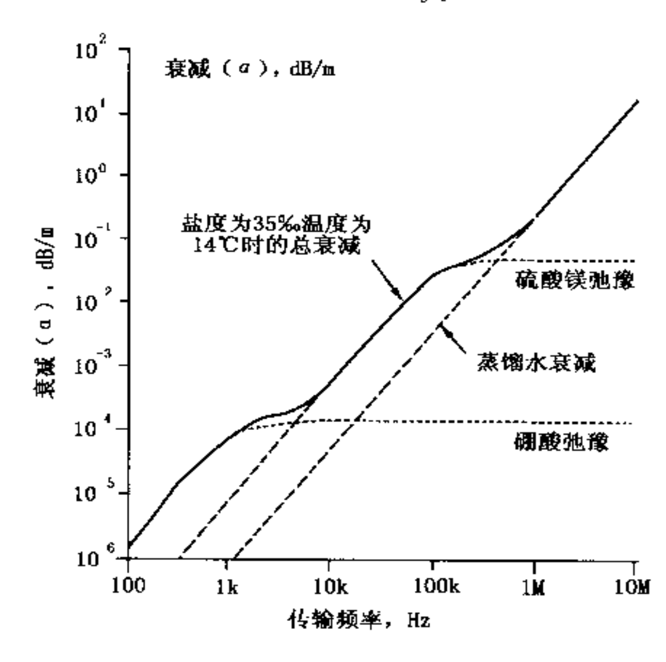


图 7-3　海水的声衰减系数与声波频率的关系

按此式计算，在 10℃、20℃ 和 30℃ 时海水的弛豫频率 f_t 分别为 91kHz、140kHz 和 206kHz，即温度升高时，弛豫频率也升高。考虑到海水的粘滞、硫酸镁和硼酸的弛豫过程，海水的声衰减系数与声波频率的关系见图 7-3。

从图 7-3 上可见，在声波频率为 0.1kHz 时，声衰减系数为 0.001dB/km，即传播 10000km，声波衰减 10dB，即为原来声波能量的 1/10；当声波的频率增加为 1kHz 时，声衰减系数增大为 0.05dB/km，即传播 200km，其能量将衰减为原来的 1/10；声波频率为 10kHz 时，声衰减系数为 0.5dB/km，传播 20km，其能量将衰减为原来的 1/10；在声波频率为 100kHz 和 1MHz 时，声衰减系数为 25dB/km 和 70dB/km，声波仅传播 400m 和 150m，其能量就衰减为原来的 1/10。因此，要探测海洋中远距离处的目标，应该用较低频率的声波信号。

在海洋中，除了由于粘滞和弛豫产生的声衰减外，海水中的气泡、生物和任何悬浮物体，都可能反射或折射声波，造成声波在原来传播方向上的衰减。

还要说明的是，由于水的密度比空气的密度约大 770 倍，而水中的声速比空气中的声速大 4 倍，因此声波从海水中传播到空气中时，其声压将降低约 3000 倍，所以在空气中难以听到海洋中的声音。另外，与在空气中相比，海水的声衰减系数比空气的声衰减系数要小，因此海洋实际上并不“安静”，海水中的噪声还是活跃的。

三、海洋中的环境噪声

海水的运动、气流与海面的摩擦、海洋和海底的各种自然现象（如地震及海洋生物的活动）和人类活动（如航船或潜水艇的运动）都可能产生海洋噪声。各种来源不同的噪声其频率、能量差别极大。总声强级和谱级是定量描述噪声的两个参数。总声强级 L_w 是宽带噪声功率 W 与标准声功率 W_o（在空气中，标准声压为 20μPa，在海水中，标准声压为 1μPa。标准声功率是声压为标准值时的声功率值，记为 W_o）比值的对数，即：

$$L_w = 10\lg(W/W_o)\quad(\mathrm{dB})$$

谱级是将噪声按频率分类，求出 1Hz 带宽中的平均声强级（或声压级），从而可以看出噪声在哪个频段强，在哪个频段弱。

海洋中某一点的噪声值是海水中各种原因产生的噪声的总和，其频段约为500Hz～25kHz。但也有部分噪声的频段在50kHz以上以及20Hz以下。海洋中的噪声，按其产生原因可分为以下几类。

1. 海水的热噪声

由于海水的分子热运动所产生，其频段为50～200kHz的超声频段，并且是海洋中这一频段噪声的主要组成部分。海水热噪声的频谱是随频率升高，高频部分的振幅增加的上升谱。

2. 水动力噪声

由海浪、海流、拍岸浪、风、雨滴以及海水中小气泡空化所产生的噪声，这种噪声和与风速、海况有明显关系，水动力噪声中，风成噪声所占比例较大，苏词中“惊涛拍岸，卷起千堆雪”所产生的噪声即属此类，其谱级主要取决于风速，其频率范围约500Hz～25kHz。在海上，甚至是海上降雨也会产生频段极宽的噪声。海面波浪产生的噪声随深度衰减很快，但在浅海，波浪产生的噪声是主要的低频噪声源。

3. 冰下噪声

冰山的运动（沿某方向移动或振动）、冰块破裂、浮冰的汇集、吹过冰面的气流的不稳定性、冰山附近气温变化（导致冰山融化或体积增加）等因素引起的噪声。在海况相同时，有冰山的海域噪声要比没有冰山的海域的噪声大6～10dB。

4. 由地震、海底火山爆发、大尺度湍流和原处风暴产生的极低频噪声

目前，全世界在陆地上发现的火山约600余座，而仅太平洋海底就发现约1万座火山。在全世界的海洋中，每年约有几十次火山爆发，同时也有大量岩浆喷出。在全世界的大洋海底，每天都发生几次有感地震及次数极多的微地震，并产生频率为20Hz以下的次声频段的噪声。

1952年9月，在日本东京以南300km的海底发生火山爆发，远在离火山8000km以外的水下水声接收系统在9月15～16日就接收到与火山爆发有关的噪声信号，而在近距离处的观测船和飞机上，直到9月17日才观察到火山爆发和同时发生的海啸。这次火山爆发延续到9月26日，在爆发结束前的9月24日，一次火山爆发使日本派出的水文观测船沉没，也还是通过分析由在8000km以外的水声观测系统所记录到的水下噪声信号，才查明了24日的火山爆发和沉船原因。

5. 海洋生物噪声

海中能发声的生物有甲壳类无脊椎动物，鱼类和哺乳类中的鲸和海豚等，这些生物所发出的噪声会对声纳探测产生强烈的干扰。甲壳类如蟹类和螯虾，在捕食和进食过程中，用其钳和触角撞击或摩擦发声，噪声频段为20Hz～20kHz。在温暖海域中，甲壳类生物产生的噪声主要在10～20kHz范围内。大部分鱼类都有特别的肌肉和鳔连接或长在一起，鱼在通过鳔来改变沉浮时，与鳔连接的肌肉振动而发声。鱼类发声有明显的季节性和昼夜节律，不同的鱼种发出的声音在频谱和振幅上有明显差异，因此可以根据鱼船上的声波接收系统接收到的声波的频谱和波形区分鱼类。例如，大黄鱼通常发出持续时间约0.1s的敲击声。海洋中的哺乳类动物，例如大部分鲸、海豚都有根据回声定位的功能。例如，海豚能发出持续时间几十微秒，频率为100kHz的超声波，并可通过海豚头部的额隆（起透声窗作用）接收海豚本身发出的声波在前方物体上的反射回波，据此可确定目标的方位和距离。我国长江中的珍稀动物白鳍豚，也有声波通讯和回声定位的功能。海洋中各种动物发出的声音的频率范围很

宽，因此对声纳系统的干扰十分明显。

6．船舶噪声

船舶的噪声源于船舰上的主机（旋转速度分别为200转以下、300～750转、800转以上的低速、中速、高速的柴油机和燃气轮机）的机械振动通过船体的外壳辐射到水中，这是船舶的主机噪声。另外最重要的船舶噪声的来源是船舶螺旋桨转动时发出的噪声。在螺旋桨高速旋转时，在螺旋桨的叶面上压力降低，产生负压区，在这些区域，海水容易发生空化，产生大量气泡，这些气泡又被高压区的压力挤碎，产生噪声。舰艇，尤其是潜水艇在航行时产生的噪声是猎潜舰捕捉的目标。因此改进螺旋桨的设计和提高加工质量，减少螺旋桨的噪声是舰艇研制的重要课题。

远处船舶航行所产生的噪声，主要频段在100Hz左右，是50～100Hz频段内的主要噪声源。船舶噪声随频率升高，其声压级略有降低，例如，在距离航行时速为37km（20n mile）的巡洋舰10m处（水下），频率为100Hz的噪声的声压级为150dB [$1dB=1\ (\mu Pa)^2/Hz$]；频率为1kHz的噪声的声压级为129dB；频率为10kHz的噪声的声压级为109dB。

为保证船舶安全行驶和船上乘客的舒适，规定在无人的机舱内声压级不超过110dB，有人值班的机舱内声压级不超过90dB，驾驶室不超过65dB，客舱不超过60～65dB。为了降低船舶的主机噪声，要采用各种隔振措施：对主机加隔振器（其共振频率应低于主机基频的1/6），在机器上安装有吸声衬里的隔声罩等；在内燃机或燃气轮机的进气口和排气口加消声器等。而为减少螺旋桨的噪声，则在螺旋桨的桨叶设计、材料选择、安装位置（如与船底的距离）等多方面都需要考虑。

四、声学方法和技术在生态环境研究中的应用

在海洋勘测和开发中（尤其是海底的勘测），在对海流和海水的水文研究中，以及海底沉船和水下障碍物的定位、鱼群的探测中，声学方法都是重要而有效的方法，甚至是唯一的方法（例如，海洋水深的测量和海底地形的测绘）。

在海洋勘测中，应用最早、最普遍的是反射波法（或回声探测法），即利用海底或水下障碍物对声波信号的反射对海底或障碍物定位。在第一次世界大战期间，由于潜水艇在水下作战的需要而研制发展的声纳技术，从最初的被动式声纳（接收敌方船舰发出的声波信号）发展为主动式声纳（接收由探测主体发出的声波在目标物上的反射信号），探测目标也从识别在水面航行的船舶扩展为游动的鱼群（鱼类的鳔虽仅占鱼身体的5%，但由于鱼鳔内为空气，其反射信号占鱼整体反射信号的1/2，因此可根据鱼鳔和海水对声波信号反射的差异识别鱼群）。

由于声波在与海水顺流时，声速增加，与海水逆流时声速减小（多普勒效应），因此，在海洋中测量固定的两点相向发出的声波到达的时间差，即可测量出海流的速度。在相当多数目的测点上进行海流速度的测量，即可监测一定尺度的海水湍流状况。上述的方法都已发展成为成熟的方法和技术，并有相关的专门著述。本书仅介绍有关与生态环境有关的海洋声学技术与方法。

1．海水运动和变化的测量及海面气候和海况预测

与海底的地形探测、水深探测不同的是，海底的地形、结构在较大的时间尺度上（几百～几千年）变化不大。而海水的运动，包括在不同海域、不同深度处海水的温度、海流运动方向、流速等则是随年、月、日，甚至是随时变化的。这些数据是海洋的“脉搏”，是影响地球气候变化的重要参数。要掌握海洋的温度、海流的方向和流速的变化，就要进行大量的

观测，这些观测经常是通过海洋调查船来进行，但海洋调查船的数量有限，每个航次所获的探测结果与海洋的规模相比，真正是"凤毛麟角"。而在海洋中大量设置观测站形成网络，又受到建站要求的供电、通讯和数据传输设备的限制，现代社会还不可能建立像陆地的气象台站网络规模和密度的海洋观测台站网络。另外由于海水对无线电波的强烈吸收，也不可能像气象台站一样用无线电波进行测量。因此，用声学方法和声波技术进行各类海洋观测就是最有效的方法。这些方法是：

利用声传播时间测量海流速度。海洋暖流的水温比一般海水的温度高，暖流的位置和边界是变化的，并影响气候和鱼群的游动，为测量海水的流动速度，可在距离为 d 的两点放置两套可进行声波发射和接收的探头，各自接收对面探头发射的声波信号。如果，一个探头接收到的声波是顺海流方向的，则顺流传播的声波到达另一探头的时间 $t_1=d/(v+u)$，逆流传播的声波到达的时间为 $t_2=d/(v-u)$，式中 v 和 u 分别是海水中声波的传播速度和海流的速度。根据测量得到的 t_1、t_2 和已知的 d 可求出海水中的声速 v 和海流速度 u。还要说明，在海底起伏不大时，若用回声探测仪测量海水深度，则在声速较高的暖流区，声波由海面到海底的传播时间较长；在海水温度较低的区域，声波由海面到海底传播的时间较短。如确知海底起伏不大或海底的深度，则也可根据声传播时间的变化确定暖流的边界。

温跃层和内波的测量。由于太阳的照射，海水上层温度较高，下层温度较低，由高温到低温变化很快的层段叫温跃层，在温跃层中，除了声速的差异外，海水的密度也有明显变化，同时，在温跃层中由于水温的差异，会产生波涌，叫做内波。内波对水工建筑、潜水艇活动和声波传播都有明显影响。为查明水面以下温跃层的位置，可用较高频率的声学探头垂直向下发射声波，在声速和密度变化明显的跃温层，声波会有明显的反射；由于跃温层内波的波涌，反射界面会有波动起伏，因此也可测定内波的传播和分布范围。

海浪和海面变化的测量、海啸的预测。波浪是海洋噪声的主要来源，噪声中的高频成分主要是近处海面风与海面摩擦产生的波浪引起，而低频噪声（尤其是次声）则是由相当远处传播来的。若在海底放置指向性为垂直指向海面的高频声学探头，则其接收到的噪声幅度就能反映海面的波浪高度和风速。研究表明，海面波浪产生的频率为 500～5000Hz 的噪声与海面的风速和海况有关，对此频段的噪声进行监测，可评价海面的风速（风级）和海况。而在近岸海面放置的低频或次声波接收探头则可接收到远处震源（例如地震和海底火山爆发）产生的次声波，由于声波的传播速度远大于地震和海底火山爆发时产生的海啸巨浪的传播速度，因此接收巨浪产生的低频噪声或次声波可以预测海啸。不少种类的浮游生物都有接收次声波的功能，例如，水母在风暴或海啸到来前都会接收到低频噪声或次声波而向海洋深处游动，以免在海啸或巨浪到来时被抛上海岸，粉身碎骨。

2. 温室效应和海洋温度的声学测量

由于人类活动排放的二氧化碳增加，产生温室效应，致使全球气候变暖，这会使地球上温带和寒带地区的生长季变长，生物的活动范围向两极推进。但也会使两极冰川融化，海平面上升，沿海的一些城市和陆地被淹没；还会使气象灾害（如台风）频繁。因此大气层中二氧化碳含量增加，全球气候变暖，致使生态环境变化，已经成为全世界都关注的重要问题。现代科学已经证明，大气层中二氧化碳含量的增加是产生温室效应的主要原因，而且大气层中二氧化碳含量的增加是可以测量的。Keeling 等对大气层中二氧化碳的浓度变化进行了 30 年的连续观测。后来又有人将 Keeling 的观测资料和在南极冰芯中二氧化碳含量的取样分析结果进行对比，发现两者是一致的。据此推算，大气层温度每 10 年约增加 0.5℃。但对这

一推测值，还没有实验观测结果加以证实，因为在大气层中测量平均温度的工作在现代科学的水平上是相当困难的：在空间上，两极和赤道附近的温度差异明显，对流层底部和顶部温度也明显不同；在时间上，昼夜温差明显，甚至可达几十摄氏度。因此，要校正温度随空间和时间的变化，求出可置信的全球大气层温度的平均值，所要求的观测点的数目、观测的时间重复频率、观测的精度，乃至观测方法的归一化，观测数据的统计、分析和整理，其工作量是难以完成的。所以，目前对温室效应能使地球温度升高多少，还停留在推测阶段。有人提出，在大洋深处，海水的温度比较稳定，受空间和时间变化的影响较小，因此能否通过测量海洋深处海水温度的变化来评价温室效应对地球温度变化的影响？

Munk 通过计算认为，在深 1000m 处的海水，由于温室效应，每年温度升高 0.004℃，由于温度的升高，相应的海水声速要增大 0.02m/s，即约海水平均声速（1500m/s）的十万分之一略多一点。声波传播 1 万 km 所需的时间，则每年由于温室效应使海水温度升高引起的声速增加将减少 88ms（在 1 万 km 的尺度上测量声波的传播时间是为了消除海水中中等以下尺度的湍流、涡旋产生的温度起伏）。

为了能根据声波传播时间的减少来测算海水的温度变化，在测量技术上要解决以下几个关键问题：第一，要有发射功率足够的声学探头，使在声波传播 1 万 km 以后仍有可被测量记录的幅度（能量）；第二，传播的声学信号和测量记录的信号要保证能测量出几十毫秒的时间差；第三，由于要使声波能传播 1 万 km，声波信号的频率必须降低为几十赫兹，这与鲸类通讯的频段重叠，因此声波的发射应该不影响鲸类的生存环境。1991 年在印度洋的赫德岛附近的水下安置了一个频率为 57Hz 的声源，并在全球范围内进行接收的实验，其结果证明，上述的三个问题都能解决。因此，通过测量深处海水中声传播时间的变化来估算海水由于温室效应引起的温度上升的工作得以延续。用船舶来接收固定发射地点发射的声信号，难以保证多次测量的路径完全一致，因此建议在太平洋布设一个以夏威夷群岛为中心，在太平洋东西两岸都有观测点的网站系统，进行常年观测，以期根据多年的深处海水声速测量估算海水的温度变化并评价温室效应引起的地球温度变化。

第三节 地壳的声学性质和地壳中的声波传播

地球除了大气层和海洋以外，还有固态的地壳以及地壳下面的地幔和地核，即通常可视为固态的地球。在固态的地球上，地表是人类生存的主要空间，地壳则提供人类生存所需要的矿产资源。地表和地壳中的地震、火山、泥石流、滑坡等自然现象又影响人类的生态环境，地表和地壳中的固体介质又是传导声波的介质，但其结构比大气层和海水更复杂，因此声波在地壳和地幔、地核中的传播也表现出更多的特征，而在固体地球中声波传播的特征又可作为认识地壳中矿产资源、自然灾害及生态环境变化的依据。

一、地球的分层结构

和大气层以及海水一样，固体地球也是分层的。固体地球的平均密度为 $5.52g/cm^3$，而地表附近土壤和岩石的密度多在 $2.8g/cm^3$ 以下，因此可推断地球内部的物质密度大于 $5.5g/cm^3$（地核的平均密度达 $11g/cm^3$）。而对地球内部分层结构的定量认识和区分则主要依据地震学和弹性波（声波）速度。根据地震波速度的差异，固体地球大体上可分为地壳、地幔和地核三部分，其中的每一部分又可分为各种层段。即固体地球可分为物理性质随深度变化的若干层段。早在 1909 年莫霍洛维奇（A.Mohorovicic）发现在地下深度为 56km 处存

在一个地震波速度的间断面，在其上，地震波速度为 5.6km/s；在其下，地震波速度为 7.8km/s。此地震波速度间断面被命名为莫霍面（M 界面），该界面为地壳和上地幔的分界面。在地球的陆地部分地壳的厚度约 15～80km；而在海洋部分，地壳厚度包括海水在内仅 11km。1914 年古登堡（B.Gutenberg）测定出在深度为 2900km 处（与现代科学测量结果仅相差 15km!）为地幔和地壳的分界面，此界面因此被称为“古登堡不连续面”。1936 年莱曼（I.Lehmann）提出在地核内还有一个分界面，并认为在分界面以上的外核没有记录过有横波通过（横波不能通过液体传播），因此推断地球的外核是液态的。因为地球内部的物理性质（密度、弹性力学参数等）、化学成分都和地震波的速度有关，地震波的速度分布是研究地球内部构造的最可靠的数据，而地球内部的结构模型和各层段的差异主要是由地震波的速度来建立和区分。表 7－2 为根据弹性波速度划分的固体地球的分层结构。

表 7－2　固体地球的分层结构和弹性波速度

分层		深度范围，km		纵波速度，km/s	横波速度，km/s
		陆地	海洋		
地壳，A 层		15～80	2～11	5.5～7.8	3.1～4.4
上地幔	盖层	70～150	11～60	7.8～8.5	4.4～4.8
	低速层	150～220	60～220	7.9	4.4
	均匀层	220～350		8.5～8.8	4.6～4.7
过渡层		350～700		8.8～11.1	4.7～6.2
下地幔	上部	700～2740		11.1～13.7	6.2～7.3
	下部			13.7	7.3
外核		2891～5149		8.06～10.4	0
内核		5149～6371		11.0～11.3	3.5～3.7

还要说明，地壳的质量约占地球总质量的 0.4%，地幔占 67.2%，地核占 32.4%（大气层占 0.00009%，水层占 0.024%，即大气层和水层仅占地球总质量的 0.03%以下）。

固体地球并非完全弹性，其非弹性至少表现在流动和粘滞性两个方面。由于地球内部物质处于高温高压条件下，并且在热学和力学性质上是处于不平衡状态，因此必然存在某种流动，最明显的流动是地球外核的对流，外核的对流可解释地磁场的成因（见本书第五章）。而地幔的对流则可以说明地球上洋底分裂、大陆漂移、板块俯冲等现象。固体地球的粘滞性则表现为在发生振动时能量的消耗，例如，弹性波（地震波）的幅度（或能量）随传播距离的增大或传播时间的增加而减少，就说明地球作为介质，在弹性波传播时要吸收弹性波的能量。地球的粘滞性通常可用无量纲的品质因素 Q 表示。Q 的定义是在一个周期（2π）的振动中，储存在系统中的能量 E 与由于（粘滞性）所消耗的能量 ΔE 的比值：

$$Q = E/2\pi \cdot \Delta E$$

地球某部分在传播弹性波时衰减越大，其品质因素 Q 越小。通常认为，地壳的 Q 值约为 500；上地幔的 Q 值为 100；在 400km 以下，Q 值逐渐增大；在地幔底部和外核，Q 值为零；内核的 Q 值约 500。在地壳的岩石中，Q 值与岩石的密度、孔隙度、含水饱和度有关。低 Q 值的区域往往是地震波的低速带和构造活动明显的区域。

对地球流变性的认识，目前较一致的认识是：地壳近似是弹性的；在地表以下 200～300km 处的上地幔中，有一软流层，其特点是介质在软流层中有对流运动，软流层中其边界在 700～2900km 处，众说不一，但深度再增加时，地幔介质的粘滞性增大；地球的外核是能流动的液态介质；内核是流变性差的接近于固态的介质。

二、矿物和岩石的密度、孔隙度和声波速度

矿物的密度取决于构成该矿物的各种元素的原子量和矿物的分子结构；地壳中石油的密度由其成分决定，通常年代老的石油的密度略低；地层水的密度取决于水中所溶解的盐类的成分和含量（矿化度）。

岩石的密度取决于其种类（岩浆岩、沉积岩、变质岩）、矿物成分、结构、孔隙度及成岩条件。

对于岩浆岩，其密度取决于矿物成分和生成条件。随岩浆岩中所含二氧化硅（SiO_2）量的减少及铁镁氧化物含量的增加，岩浆岩从酸性演变为超基性，其密度增大；在金属矿区，岩浆岩中金属矿物含量增加，其密度也随之增大。侵入岩和喷出岩虽然都属于岩浆岩，但由于生成条件不同，即使矿物成分相同，其密度也有差异，通常喷出岩形成时与大量空气接触，往往有较大的孔隙度，因此其密度比矿物成分相同的侵入岩的密度小。

沉积岩的密度取决于其造岩矿物的矿物成分和密度、孔隙度以及孔隙中流体的性质。通常碳酸盐岩（石灰岩、白云岩）和石膏一类水化学沉积岩的造岩矿物的密度较高，孔隙度较小，因此其密度较大；砂岩、粉砂岩、泥岩等碎屑物沉积岩的矿物密度较低，孔隙度较大，因此其密度较小。还要说明，沉积岩的孔隙度变化范围很大，通常达 2%～35%，随沉积岩孔隙度增加，其密度减小。沉积岩孔隙中往往含天然气、石油和水，在孔隙度一定时，随沉积岩孔隙中所含流体的密度的增加，其密度也增大。在石油与天然气地球物理勘探中，可据此识别储集层中所含的是石油、天然气或是水。沉积岩的密度还取决于其所在的地质构造的位置和埋藏深度，通常在地质构造承受应力明显的部位和埋藏深的层段，其孔隙度小，因而密度大。

变质岩的密度主要取决于其矿物成分，因为变质岩的孔隙度数值很小，而且变化范围也不大（变质岩的孔隙度一般为 0.1%～3%，极少超过 5%）。变质岩的密度还取决于变质作用的性质，纯粹由机械力作用而发生的变质（碎裂）形成的变质岩的密度在变质应力较大时，变质岩密度大于原岩；而变质应力较小时，变质岩的密度小于原岩。在一定温度和压力作用下发生重结晶的变质岩，一般地都会由于重结晶生成的矿物密度增加，因此密度大于原岩。表 7－3 为常见矿物、岩石的密度、孔隙度和声波速度的数值。

表 7－3　常见矿物、岩石的密度、孔隙度和声波速度

岩石或矿物名称	密度，g/cm^3	孔隙度，%	纵波速度，km/s	横波速度，km/s
矿物				
石英	2.65		6.03	4.11
白云母	2.76～3.1		5.81	3.36
石墨	2.09～2.25			
赤铁矿	4.9～5.3		6.7	4.32
磁铁矿	4.9～5.7		7.4	4.20

续表

岩石或矿物名称	密度，g/cm³	孔隙度，%	纵波速度，km/s	横波速度，km/s
石油	0.76～0.96 （T=20℃）		1.3	
岩浆岩				
花岗岩	2.5～3.1	0.2～4.1	4.8～6.1	2.7～3.23
闪长岩	2.7～3.0	0.4～4.0	4.6～6.1	3.06～3.16
玄武岩	2.7～3.2	18.7	4.5～7.5	2.72～3.21
橄榄岩	2.9～3.4	0.1～0.31	7.4～8.7	3.79～4.85
变质岩				
石英岩	2.5～2.9		5.6～6.1	
大理岩	2.6～2.9	0.1～2.1	2.50～6.94	2.02～3.86
片麻岩	2.6～3.0	0.4～7.5	5.20～6.35	2.45～3.55
沉积岩				
砂岩	1.8～2.8	2～35	0.8～4.5	
页岩	2.4～3.0	1.5～44.8	0.3～4.7	2.86
石灰岩	2.3～3.0	2～23	1.0～7.0	2.75～3.59

纵波速度 v_p 和横波速度 v_s 是矿物和岩石的两个重要地球物理参数。矿物的声波速度与其密度有关，对石英、长石等常见的造岩矿物，声波速度随密度增加而增大；对金属矿物和天然金属，随密度增加，其声波速度下降。在各种矿物中天然金属的声波速度最低，例如，天然金的纵波速度 $v_p=2.00$km/s，横波速度 $v_s=1.18$km/s。硅矿物和不含铁氧化物的矿物，如刚玉、黄玉、尖晶石等的纵波速度为 $v_p=9～11$km/s；晶格规则的金刚石的纵波速度 v_p 可达 18.3km/s。多数造岩矿物的纵波速度 $v_p=5.50～7.50$km/s。

岩石的声波速度取决于造岩矿物的岩性、密度、孔隙度和孔隙流体的性质。岩浆岩和变质岩的声波速度与其密度的关系接近于线性关系，密度大的岩石，其声波速度亦高，而且随含水饱和度增加，纵波速度和横波速度都增大，但纵波速度的增大比横波速度的增大更明显。片麻岩类有片理的岩石，在声波速度上呈现明显的各向异性，沿片理方向的声波速度可比与片理垂直方向约大一倍。

沉积岩的声波速度除与造岩矿物的成分、密度有关外，还取决于孔隙度，在岩性一定时，沉积岩的声波速度与孔隙度关系明显。地表土壤和黄土的声波速度由于孔隙度大而呈现很低的数值，砂岩、粉砂岩和页岩的声波速度中等，碳酸盐岩的声波速度较高。沉积岩孔隙中含水时其纵波速度比含天然气时高，但横波速度比含水时略低。沉积岩的声波速度还和其所在地质构造部位（例如，风化壳附近）、埋藏深度（承受压力）有关。

沉积岩的声波速度还与声波的频率有关，亦即沉积岩有频散，通常是随声波信号的频率增加，岩石的声速增大。实验研究结果表明，砂岩和泥岩的声频散主要发生在 50～400kHz 频段；干燥的泥岩的声频散比砂岩的明显；含水砂岩的声频散比干燥砂岩明显。沉积岩频散的原因和机理十分复杂，有研究认为，岩石的声频散是由于岩石本身的非弹性（粘滞、弛豫等过程）对声波吸收所致，孔隙度大的砂岩、泥质含量高的砂岩和泥岩，其频散明显。对于

燥的岩石，频散是由于声波在岩石中传播的散射所致；对含水的岩石，频散与声波传播过程中的散射和粘滞作用有关；在某些特征频率下的频散增大，则可能与声波在岩石中传播的弛豫吸收过程有关。实验研究表明，对于较疏松的砂岩（孔隙度为16.6%～21.1%），在干燥的条件下，在51kHz～1MHz）频段内（用频率为51kHz、350kHz、450kHz、500kHz、1MHz的声学探头进行测量），其频散度D_p｛$D_p=(v_{pmax}-v_{pmin})/v_{pmin}$｝，$v_{pmax}$及$v_{pmin}$分别为在上述频段内纵波速度最大值及最小值）为6.59%～13.1%；在饱和水时，频散度略有升高，为8.8%～15.3%。显然在饱和水时频散增大。对较致密的岩石（孔隙度为2.5%～3.7%），在干燥条件下，其频散度为7.7%～18.8%；在饱和水条件下，其频散度为16.5%～20.3%。上述实验表明，不论是疏松还是致密的岩石，含水时的频散都比干燥时明显。而实验中，较致密的岩石的频散并不比疏松岩石小的原因是，这些岩石的孔隙度虽小，对泥质含量较高。由此可见，沉积岩孔隙中的液体和固相的泥质是影响岩石频散的重要因素。

三、地声和地质灾害的预测问题

地球的固体部分与大气层和水层相比，其结构要复杂得多，固体地球在相态上的非单一、在空间分布上的非均匀性和各向异性使固体地球呈现明显的多样性，更由于对固体地球的观测空间和条件限制，使对固体地球的研究比对大气层和水层的研究更困难。但是，固体地球随空间和时间的变化远不如大气层和水层的变化明显。与大气层和水层相比，甚至可在一定尺度上认为固体地球是稳定的。对固体地球来说，声波方法是能穿透地球的少数几种探测手段，因此地声学在固体地球的研究方面有独特的作用。

地声（Seismo－sound）是一个并未完全定型的概念，其语义源于希腊文——Seismos，即地震。因此地声最早的含义与地震有关，但广义地说，地声是指地壳和固体地球中一切声波信号，其中也包括由人为声源产生的声波信号。就固体地球本身产生的声波信号而言，其产生机制通常是地壳中某一部分由于能量的快速释放而产生的弹性振动。例如，地震、火山爆发、泥石流、山头、山体滑坡、坑道陷落、岩石崩塌以及岩层中天然气、水、石油的溢出都可发出地声。

1. 地震的地声

在地壳中由于快速释放能量而发生地震时，产生地震波，其中一部分从地层中传播进入空气，形成人耳可听到的声波，这就是地声。地震产生的地声实际上有三种类型：第一种是声发射，即当地壳岩石中的应力达到其破裂强度的一半时，岩石就开始以发射声波的形式释放能量，这就是岩层在微破裂时产生的“微观地声”，即声发射。岩层在宏观破裂前的声发射分两类，一是单个的声脉冲，所发出的声波频段极宽，脉冲的时间间隔也有很大的随意性；另一类是频度很高的声脉冲系列。地震前声发射的特点是随接近地震发生的时间，由单个的声脉冲向脉冲系列演变。声发射时，发出的声脉冲的幅度与岩层的结构特征（强度及非均匀性、各向异性）、形变率、地温有关；声脉冲的频度则与岩层结构、岩层中裂缝的发育程度有关；声脉冲的主频则与岩层破裂的速度成正比，与破裂时产生的裂缝的线度成反比。

第二种是在岩层发生宏观破裂。在地震的孕震过程中，由于岩层中存在断裂、节理、裂缝、空洞等容易产生应力集中的结构，使岩层的应力分布呈现一种非稳定状态，在岩层中的应力（或应变）积累到一定程度时，即以岩层的形变、微观裂缝的形成和发展等形式释放能量（以使应力分布重新达到稳定状态），此时地震开始，并以地震波的形式释放能量，其中传播速度快、但破坏作用和震感弱的纵波先传播到远处，并折射进入空气中。这样在距离震源较远处，往往先听到地声后感觉到地震，这就是“超前”于地震的地声。当地震的震级很

高或震源较浅时，传播速度快的纵波也有强烈震感，这时听到的地声会由于纵波从地层折射进入空气传播到人耳的时间要比地震纵波经地层传播达到人所在位置滞后（空气中纵波速度低于地层中纵波速度），因此，这时是先感觉到地震，后听到地声。若地声明显超前于震感，则可根据地声预测地震。这种地声主要是由于地震的纵波所产生。

第二种可能的地声机制是，在震前，随岩层中应力的增加和裂缝产生，岩层或地壳中的气体在地球电磁场、放射性物质和高温等因素作用下，以离子的形式进入大气，或吸附于尘埃及地表物体，或以凝结核的形式生成低空的浓雾。当这些电离的气体积累到一定数量时并有外界诱发原因时，就会在接近地面处放电并产生地光和地声。

研究地声的重要目的之一是预测地震。如上所述，最有预测价值的是岩层尚处于微破裂阶段的声发射所发出的地声。由于地声在岩层中传播的过程十分复杂：在相邻近的地层分界面上，会发生反射和折射，还会有波形的变化，而且在传播过程中有明显的衰减。所以传播到地表的地声仅是一系列经过衰减（主要是高频成分，传播到空气中的地声可能仅是所产生的地声的能量的一亿分之一）而且波形又经过变化的脉冲波列。通常在岩层发生微破裂阶段，发出的地声多为单脉冲形式。在裂缝发展阶段，特别是临震阶段，脉冲的频度增加，发展为持续的波列，或是单个脉冲与持续波列的交替。由于地声的频率和波形的差异，能听到的地声也有区别，有的如雷声，有的如风声，各不相同。

即使在地震前有各种地声出现，对根据地声预测地震还有相当困难。首先地声的声源不是点源，而可能是面源或体积源，因此即使根据地声的传播能确定地声声源的位置，也难以预测地震震源的准确位置。其次，地声异常和发震时间的间隔随机性很大，可以是发震前几分钟至几个月，这样仅根据地声预测地震就相当困难。另外地声异常只表明地层微破裂活动的发展，产生地声的岩层，有可能是微裂缝发展、扩大最后以发生地震为结果，也有可能形成新的地应力平衡分布，并不发生地震。虽然如此，地声的观测和研究仍然是预测地震的重要方法，为了观测地声，通常在地下（如井中）测量记录地声，这样记录的地声比在空气中记录到的地声有较大的幅度。还要说明，有些动物（如鼠类、猫、狗）对地声的反应比人敏感，因此地震前有某些动物对地声反应的“动物异常”现象。

表 7－4　我国某些地震震前的地声

地震日期 年．月．日	震中位置	震　级	地声出现超前地震时间	地　声　描　述
1920.12.16	宁夏海原	8.5	几 d	撕布声、沟内空响
1935.4.21	台湾新竹	7.1	1d	远雷声、打炮声
1954.2.11	甘肃山丹	7.25	1 月	打炮声
1969.7.26	广东阳江	6.4	2d	水中有声
1970.1.5	云南通海	7.7	2d	风声、百鸟飞过声、雷声
1974.5.11	云南大关	7.1	10d	吼声
1976.7.28	河北唐山	7.8	6h	吼声、雷声、隆隆声、“嘎叭”声
1976.8.16	四川松潘	7.2	2h	雷声、鼓声、撕布声、警报声

2. *矿山和石油天然气井的地声*

矿山地声的研究开始于20世纪前期，其实际意义是根据地声预测矿井，尤其是煤矿矿井中的岩层崩塌、煤层气泄露等事故。与地震前的声发射现象类似，在矿井中，由于开采过程中岩层应力分布的变化、在空洞、裂缝、断层、节理面附近可能发生微观的变形，如形成微裂缝等，同时伴有以弹性波形式释放岩层的能量，也产生声发射，所发出的声波和地震前的地声一样，只有一小部分能折射进入空气，因此对矿山的地声通常是用专门的贴靠在岩层上的声学探头进行探测。由于煤层往往是在夹在上下两个岩层中间，而煤层的声速又低于岩层的声速，因此煤层成为声波传播的通道（所谓"声波导"），在煤层中可接收到速度最大的纵波、速度其次的横波以及速度最低但携带能量最多的表面波，在煤层和岩层中上述的纵波、横波、表面波都是有频散的，在传播过程中都会有变化，因此可根据接收到的波列得到有关岩层和煤层变形、产生微裂缝、煤层气泄露等过程中声发射的信息，并以此作为预测事故的依据。

在20世纪50年代，还在石油天然气井中发现流体通过孔洞时会产生噪声，其机制是井下流体（石油、天然气、水）在通过阻流位置（孔洞、窄缝）时，会出现压力变化，流体运动要产生摩擦，因此产生噪声。所产生的噪声的幅度、频率与流体的相态、压力、流速、孔洞或缝隙的几何形态有关。对井下各种噪声声源的研究查明：地面机械振动所发出的噪声的频率在200Hz以下；对井下的单相流动全噪声的最大幅度在1000Hz附近，随流动的压差增大，噪声的频率还可达2000Hz左右；井下的两相流动，噪声的最大幅度约在200～600Hz范围内。根据这些实验研究结果，可使井下噪声的测量大为简化，即不再需要对每个噪声声源测量其整个噪声的频谱，只需要测量记录截止频率分别为200Hz、600Hz、1000Hz、2000Hz的四条声幅曲线（也可加测截止频率为4000Hz、6000Hz的声幅曲线）。井下噪声测量仪的声系是一组截止频率为200Hz、600Hz、1000Hz、2000Hz的高灵敏度声学探头，在井下测量时，为减小背景干扰（仪器提升时产生的摩擦噪声和仪器在井内碰撞时产生的噪声），声系是在静止状态下进行测量记录，每间隔0.3048m（1ft）测一点，在每个测点上测量记录3min，得出随深度变化的井下噪声曲线。根据噪声测井曲线可以判断井下出气、出水的层段，并查明流体流动的相态；判断井下套管外没有水泥胶结的、有层间流体运动的层段（"窜槽"）；根据噪声的幅度还可计算套管外流体的流量，尤其是可以计算天然气井井壁上每个射孔孔眼的天然气产量。

以上所述及的是对岩层中自然噪声的测量和应用，在现代地声学探测技术上，应用最普遍的是使用人工声源的各种声学探测方法。除了在石油天然气勘探中早已广泛应用的地震勘探外，现代声波测井技术可在不破坏井壁，测量记录的声学信号可控、可重复的条件下测量记录地下延迟的纵波速度、横波速度、表面波速度，还可记录上述各种波的波列。根据这些测量结果，配合其他测井资料（如岩层密度测井资料），可估算岩层的孔隙度、弹性参数，可预测岩层的地应力；还可根据高频声波波束在井壁上的反射进行成像处理，得到井壁声学界面的直观图像。

在水文和工程地质上，用人工声源的探测方法可评价水库大坝坝基岩体的力学性质（强度、稳定性），水泥浇注的大坝是否有孔洞裂缝等隐患；可测量公路路基的质量，测量路面水泥、沥青层的厚度；可测定建筑物桩基的质量，测定建筑物下面地基是否有流沙层等。

第四节　人类居住环境的声学问题简述

人类居住环境的声学问题是指建筑声学问题，以及噪声问题。建筑声学虽然也是研究空气中声波的传播，但大气层中的声学问题，一般是不考虑声波传播的边界的。而建筑声学涉及的则是在一个相对封闭环境中的声学问题；人类生活受到噪声干扰的问题，则是居民，特别是城市居民最反感、投诉最多的问题。

建筑声学涉及的问题是在相对封闭的居室内空气中声波传播问题，要解决的问题一是室内听觉条件，尤其是语言和音乐的听闻条件；另一问题是控制室内的噪声。

建筑物内，声波传播会受到建筑物内表面的反射，而建筑材料的声反射系数都很大，甚至可达90%以上，加之在空气中声速较低，原始的声波和各次反射的声波往往重叠，形成干扰，使人对语言的识别能力变差。但如果室内墙壁对声波的吸收强烈，甚至完全没有反射，则人在室内听到的声音，尤其是各种乐器的声音则是很“生”和“涩”的，而使人觉得“索然寡味”。

一、室内声音的混响时间

既然声波会在室内墙壁和天花板上发生反射，因此在声源关闭后，室内的声音并不立即消失，而是要保持一段时间，逐渐消失，这种现象叫混响。使声压降低到原始声压的1/1000（或声强的1/1000000）的时间，即声压（或声强）降低60dB的时间，叫做混响时间，记为T_{60}，这一概念是1900年由塞宾（Sabine）提出的。混响时间与房间的体积V成正比，与房间内对声波的总吸收量成反比，混响时间T_{60}与房间体积V，房间内总表面面积S、表面的平均吸收系数a的关系为（塞宾—努特生公式）：

$$T_{60} = 0.163V/(S \cdot a + 4mV)$$

式中m为与室内温度、相对湿度和声波频率有关的衰减系数。在房间不大时，$4mV$这一项可忽略。

因为室内的混响时间过长和过短都不好，过长容易影响对语言的分辨，过短则影响听音乐的效果。至于房间的混响时间多长合适，则要根据房间的功能（音乐厅、会议室）和人的爱好来确定。一般来说，混响时间过短（混响太弱），声音显得沉默、枯燥；混响时间太长（混响太强）则又会使声音混肴不清。对于以语言传播和音乐、戏剧演出为主要功能建筑物，如会议厅和话剧院、音乐厅、歌剧院，对混响时间的要求是不同的，另外演奏的音乐的风格也对混响时间有不同的要求。

一个房间也和任何一个振动系统一样，有固有的振动频率和振动方式，即在某些固有的频率上容易发生共振。所以如果在房间里有一个频率分布均匀的声源发出声音时，在离声源等距离处各点上，不同频率的声压是不相同的，对应于房间的共振频率的声压将有明显的升高。这样同一房间中，不同频率的声音的混响时间也是不同的。有一种观点认为，房间的最佳混响时间的选择应该是使复合声的各种频率的声音同时降低为听阈值，由于低频声音的听阈值高，因此要求低频声音衰减得慢些。还有一种观点认为，在房间里最佳混响时间的选择应该是复合声的各种频率成分同时衰减。这样，听阈值较高的低频成分将较快的在房间内消失，而“绕梁”不绝的“余音”部分则是高频成分。表7－5是北京部分建筑物的声学混响时间。

表 7－5　北京部分公共建筑物的各种频率声音的混响时间

名　称	用途	体　积 m^3	观众人数	各种频率的混响时间，s				注
				250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	
大桥剧场	歌剧	8200	1560	1.58	1.76	1.85	1.64	空
				1.90	1.07	1.28	1.09	满
首都剧场	话剧	6000	1200	1.23	1.14	1.20	1.28	空
				1.69	1.74	1.80	1.79	满
人民大会堂		91000	10000	2.4	2.4	3.1	3.5	空
首都体育馆		163500		2.5	2.6	2.6	2.4	空
首都影院	宽	6000		1.2	1.1	1.1	1.3	空
民族宫			1150	2.75	2.7	2.65	2.45	空
北京体育馆			5000	2.7	2.6	3.2	2.6	空

注：资料摘引自马大猷等：声学手册，科学出版社，1983。

控制房间的混响时间的方法是选择墙壁、地板、天花板的材料，使之有适当的声吸收系数，例如木丝板、发泡水泥、玻璃纤维板等材料对高频声波信号都有较好的吸声性能；而用墙壁上的薄板的共振可有效的吸收低频声波信号。此外，在大的厅堂中悬挂吸声体，和观众席上的观众都能使吸声体成为三维分布。在剧场和会议厅还可利用侧面墙壁和地板的反射增加厅堂后部的声压级，使后面的观众席也能听到清晰的声音。

二、建筑隔声问题

建筑声学的另一大问题是建筑物内部的噪声控制，而噪声控制的主要问题是隔绝从外部进入室内的噪声。

进入室内封闭空间的声波一般有两种途径：第一，由空气直接传播，或是声波使某些建筑构件（如门、窗）产生振动，这种振动再向另外的封闭空间（房间）辐射声波，这种传播称为空气传声。第二种是由于机械振动和撞击使建筑物构件发生振动，成为直接声源而在房间内发声，这种传声称为结构声。

声波经墙壁传播后进入房间的声功率与入射声功率的比值（小数）称为透射（或折射）系数（记为 T），若入射声功率为 1，透射声功率为 T，则墙壁的隔声量 R 可表示为：

$$R = 10\log(1/T) \quad (\text{dB})$$

显然墙壁的透射系数 T 越小，其隔声量 R 越大。单层墙的隔声量 R 与墙的面密度 M 和声波信号的频率 f 间的关系称为"质量定律"：

$$R = 20\log(M \cdot f) - 43 \quad (\text{dB})$$

在上式中，要求声波的频率低于某个临界频率 f_c，因为在临界频率 f_c 的声波入射进入墙壁时，墙壁发生共振（按弯曲波模式共振），此时隔声量出现极小值。从上式中还可以看出，对单层墙壁，其面密度增大一倍，其隔声量增加 6dB。表 7－6 为某些常用建筑材料在临界频率 f_c 下的隔声量。

根据实际测量确定的在频率为 125～2000Hz 时的计算隔声量的经验公式为：

$$R = 14.5\log(M \cdot f) - 26$$

式中 M——墙壁材料的面密度，kg/m^2；

f——声波的频率，Hz。

表 7－6 常用建筑材料的声学性质

材 料	纵波速度，m/s	面密度，kg/m^2（厚度为 1cm）	临界频率时的隔声量 $R(f_c)$，dB
铝	5100	26.6	48.5
玻璃	5200	24.7	49.5
混凝土	3400	22.8	50.5
铅	1200	112	71.5
钢	5050	76	57.5
砖		21	48.5 - 53
木材	3800	5.5	31.5
胶合板		6.0	40.0
石膏板	6800	6.5	45.0

单靠增加墙壁的厚度来增加隔声量是不够的，因为这要增大建筑物整体的质量，耗费材料增加地基的负担，所以通常采用双层分离式隔墙，利用两层墙间空气的反射和弹性，可在不明显增加建筑材料面密度的条件下，增加隔声量。

综合考虑以上各种因素，在建筑物施工中可采用以下方法提高建筑物墙壁的隔声量：将多层密实材料（如砖）用多孔材料（如空心砖）分隔成夹层结构，可使隔声量比单层墙提高10～20dB，例如双层混凝土墙比单层混凝土墙的隔声量约增加10dB；使各层材料的面密度不相等，避免对某种频率共振而降低对该频率声波信号的隔声量；当双层墙间的空气间隙层厚度大于7.5cm时，对较宽频段的声波的隔声量可增加8～10dB；在双层墙的空气间隙层用松软的吸声材料（波纹纸板等）充填，还可使隔声量增加2～8dB。

结构声一般是撞击声，例如房屋附近施工时或重型车辆通过时产生的振动通过地表传递的弹性振动。降低结构声最根本途径是对撞击声源进行控制，其次是改进建筑物地板或楼板的防震性能，其途径是：对建筑物的表面层进行处理，增加其弹性，从而降低撞击声；在建筑物面层和结构层间采用减震措施（如木质地板和水泥底层地板间用龙骨支撑，保留空气间隙）等。

三、室内噪声问题

室内允许的噪声声压级取决于房间的功能，室内允许的噪声声压级见表7－7。

是否有安静的居住环境，是评价城市住宅质量的重要指标，将来甚至是可能影响住宅售价的重要指标。目前住宅的售价的构成往往偏重于距离市中心的位置及与主要交通干道的远近（大城市和特大城市尤其如此）。其实距离市中心和交通干道近的位置往往是城市噪声污染严重的区域，并不是最适宜于建筑住宅的区域。我国不少工矿区和城市将居民住宅沿交通干道布列，这至少在城市建设规划上是有偏颇的，其原因在于城市的管理者过分看重城市和

街道的观瞻（而且主要是给领导人看的），而忽略居民居住环境质量的要求，应该说这种倾向及其造成的后果是严重的。例如，河南省的省会郑州市，京广铁路沿南北方向穿越市区，陇海铁路则沿东西方向穿越市区，市内有四个火车站，铁路噪声约占城市交通噪声的1/3。在城市布局上，主要建筑物沿铁路线布置，京广铁路以东为省级机关、商业中心，市级机关和大型企业则在京广铁路以西。除了铁路噪声，而且每天还有数万辆机动车在省、市机关间奔走，机动车交通噪声污染严重。最明显的是该市的苗圃住宅小区（占地面积0.25km²），靠铁路最近的住宅离铁路线仅20m，夜间每小时有5列货车通过，火车通过时，室内的噪声从背景值的35dB突然增加到75dB。新迁入的住户反映在这种噪声环境下难以生活。

表7－7　室内允许的噪声声压级

房间种类	允许噪声声压级，dB	允许撞击声压级，dB
播音室和电视转播室	25～30	30
音乐厅	30～35	35
剧院	30～35	40
医院	35～40	45
电影院，会堂	35～40	—
教室	35～40	40
住宅[①]	40～45	40
办公室	40～45	40
饭店	50～55	—

注：资料引自马大猷等：声学手册，科学出版社，1983。

①另有资料认为，住宅中书房和卧室的噪声可分为1级、2级、3级，相应的噪声声压级为40dB、45dB、50dB以下。

还要看到，近内来，由于城市居民生活水平的提高，家用电器拥有量在增加，其中电视、音响等设备的保有量增加明显，成为室内的主要噪声源（有统计表明约占35%）。音响等设备发出的声音对同一幢建筑中的其他居民和邻幢建筑物中的居民都是噪声污染和干扰。因此，对邻近住宅的隔声设计及墙壁隔声量的要求都应有更高的要求。

城市常见的噪声源的噪声级见表7－8。

城市噪声中，交通噪声所占比例是最大的。在城市交通自由车流的条件下，交通噪声取决于车流量、车速、重型车所占比例、与交通干道的距离及观测点视见的干道范围等因素。例如，在英国对交通干道上行驶的轻型和重型车辆的噪声测定表明，在距离交通干道7.5m处，在车速为20km/h时，轻型车辆的总噪声（包括动力噪声和滚动噪声）为65dB，重型车辆的总噪声为75dB；在车速80km/h时，轻型车辆的总噪声为78dB，重型车辆的总噪声为86dB。

在设计建筑物的隔声要求时，周围环境噪声的参考值见表7－9。

交通干道上的交通噪声至同一幢楼的不同楼层的距离都比到底层的距离大，如果仅考虑这一因素，则高楼层的户外噪声应该比低楼层和底层低，但有测试结果表明，除了邻近高架桥的楼层的噪声级较大外，在交通干道附近的楼房的同一侧，从一层到七层，交通噪声的噪声级变化范围是52.5～54.5dB，相差不大。其中二层最低（52.5dB），一、三、七层最高，

但也仅是 54.5dB（五层为 54.3dB，四层和六层为 53.0dB 和 53.1dB），相差仅 2dB。但这些研究结果还有待更多的实测资料验证。

表 7－8　城市常见噪声源的声压级

噪　声　名　称		与噪声源距离，m	噪声级，dB
街道噪声	1．热闹街道	人行道上	88
	2．一般街道	10	82
	3．安静街道	10	67
	4．室外扬声器	10	85～90
	5．汽车喇叭	15	100～110
	6．汽笛	10～15	100～105
	7．火车声	15	95～105
	8．飞机声	—	70～75
室内噪声	9．大声谈话	5	70～75
	10．一般谈话	5	60～70
	11．钢琴声	10	60～80

注：资料引自马大猷等：声学手册，科学出版社，1983。

表 7－9　计算隔声时周围环境噪声的参考值

周　围　环　境	距　　离，m	计算时采用的噪声声压级，dB
干道线上建筑物	—	100
热闹街道上的建筑物	—	90
安静街道上的建筑物	—	70
公园内的建筑物	—	70
大工厂附近的建筑物	50～100	110
工厂区建筑物	500～800	95
火车站附近建筑物	50～100	110
邻近铁路的建筑物	50～100	95
机场区建筑物	500～1000	110
办公楼周围建筑物	—	70

注：资料引自马大猷等：声学手册，科学出版社，1983。

第五节　城市噪声污染问题

一、噪声的定义及计量方法

振动在弹性介质中的传播产生声波。在物理声学中，噪声是指频率和幅度都无规则，在

出现时间上随机性明显（在时间上断续，在统计上无规则）的声波信号。在电子学和信息论中，噪声是掩盖有用信号的、无规律的、无法预测的信号或信号变化，例如在无线电通讯中的“天电干扰”，电视图像中的“雪花干扰”等（此类“噪声”甚至并不一定以声波的形式出现）。在生理学中的噪声则是指人不需要的、“使人烦恼”的、“令人生厌”的声学信号，但是由于人的个体差异，对“不需要”的理解可以是千差万别的。例如，雨声不能说是人们普遍需要的，但对某些人群，雨声则有催眠作用。再例如，婴儿的啼哭，对多数人来说，是“不需要”的噪声，但对母亲和医护人员来说，则是饥饿或不适的信号。在生态环境中提及的噪声则要兼顾上述各种不同学科领域中的定义：物理声学中对噪声的理解，有助于追溯噪声形成的特点；信息论中对噪声的理解，则可用于判断某种声学信号是否对人的社会交往、学习、工作、休息形成干扰；生理学中对噪声并不严格的界定，则是强调应从人在生理和心理上的耐受程度来考察噪声。

在人类生存环境中的噪声若按产生的物理机制分类，可分为：机械噪声、空气动力性噪声、电磁性噪声。噪声随时间变化的特征，有稳态的、非稳态的，非稳态的噪声又有涨落起伏的、脉冲型的和无规则的等各种不同类型。按噪声产生的区域又可分为工厂噪声、交通噪声、建筑施工噪声、社会生活噪声等。还要指出，在不同区域，在不同的时间，甚至对不同人群对噪声的界定是不同的。例如在交通要道，有条件地允许机动车鸣笛，而在校园附近则是禁止机动车鸣笛的；在住宅区，白天和夜晚允许的噪声是不同的；在工厂和医院，允许的噪声也不相同。

在生态环境中提及的噪声，都是指通过空气传播的声波，即空气中传播的纵波，是以通过空气分子疏、密弹性分布变化来传播能量的过程。声波通过空气时引起的压强的瞬时变化叫做声压，记为 p，声压的单位与压强的单位一致，为 Pa（帕）。

1Pa（帕）$=1\text{N/m}^2=10^6\mu\text{Pa}$（1 微帕）

或　$1\mu\text{bar}$（微巴）$=1\text{dyne/cm}^2$（达因/平方厘米），1Pa（帕）$=10\mu\text{bar}$（微巴）；

1atm（大气压）$=10^5\text{Pa}$

正常人耳能听到的最微弱的声音（听阈）的声压为 0.00002Pa（$20\mu\text{Pa}$），这一数值被称为基准声压，记为 p_o。人能感受到的（听到的）最强和最弱的声压（声音）相差为 100 万倍。韦伯（Weber）定律认为，人的感觉器官（如耳）对外界刺激（如声音）的反应尊从对数规律，例如声压增大 10 倍，耳膜振动的幅度仅增加 1 倍（lg10）。考虑到人类能听到的最强和最弱的声音在声压上的差异明显，以及人耳对声音刺激的反应服从对数规律，通常评价噪声大小，不用声压的绝对值，而是用噪声和听阈的相对值来表示，其单位叫做声压级，记为 L_p，单位是 dB（分贝）。

$$L_p = 20\lg p/p_o(\text{dB})$$

式中　L_p——某种噪声的声压级，dB；

p——该噪声的声压绝对值，Pa；

p_o——基准声压，听阈，$20\mu\text{Pa}=2\times10^{-5}\text{Pa}$。

也可以用某种噪声的声功率（能量）W 与基准声功率 W_o（相当于基准声压时的声功率值，$W_o=10^{-12}\text{W}$）的比较，规定该噪声的声功率级 L_w，单位是 dB（分贝）。

$$L_w = 10\lg W/W_o(\text{dB})$$

式中　L_w——某种噪声的声功率级；

W——该噪声的声功率绝对值；

W_o——基准声功率，$W_o=10^{-12}$W。

表 7-10　若干典型环境的声压值及对应的声压级

典型环境	声压 p，p_a	声压级 L_p，dB	典型环境	声压 p，p_a	声压级 L_p，dB
喷气式飞机的喷气口附近	630	150	大声说话	0.063	70
锻锤、铆钉操作位置	63①	130	室内正常交谈	0.02	60
大型球磨机旁	20	120	微电机附近	0.0063	50
鼓风机、风镐印刷机附近	6.3	110	安静房间内空调机声	0.002	40
纺织车间	2	100	轻声耳语	0.00063	30
特快列车，地铁列车附近	0.63	90	树下落叶声，手表嘀哒声	0.0002	20
公共汽车内，热闹大街	0.2	80	听阈，极小的蚊子声	0.00002	0

①痛阈，人耳产生疼痛感觉时的声压。

要说明的是，声功率 W 与声压 p 的平方成正比，因而声压级和声功率级可以换算。两个噪声同时产生时，例如两个声压级分别为 $L_1=60$dB 和 $L_2=80$dB 的噪声作用在人耳上时，其声压级并不是 60dB+80dB=140dB。作用在人耳上的是两个噪声的声功率（能量）之和。

因为　$L_p=20\lg p_1/p_o$，

所以有　$L_1=20\lg p_1/p_o$，$p_1=p_o\times10^{L_1/20}=p_o\times10^3$；

$L_2=20\lg p_2/p_o$，$p_2=p_o\times10^{L_2/20}=p_o\times10^4$；

作用在人耳上的合成噪声的声功率应是 p_1 的平方与 p_2 平方的和，即合成声压

$$(p_1+p_2)^2=p_1^{\ 2}+p_2^{\ 2}=p_o^{\ 2}(10^6+10^8)$$

合成声压的声压级为：$L_1+L_2=20\lg p_1+20\lg p_2=20\lg(10049.8)=20\times4.002=$ 80.04dB。

同理，两个声压级都是 80dB 的噪声（$p_1=p_2=p_o\times10^4$）的合成噪声的声压级是：

$$L_{1+2}=20\lg(10^8+10^8)=20\lg(14142)=20\times4.15=80.3\text{dB}$$

二、噪声污染对人类健康和活动的影响

噪声污染与空气污染、水体污染和固体废弃物污染都是对人类生存和健康产生不利影响的因素。与空气污染、水体污染、固体废弃物污染不同的是噪声污染并不通过污染物对人产生伤害，而是通过物理场（声场）对人施以作用，而且伤害的部位主要是人的感觉器官（听觉和视觉）和神经系统。

噪声对人健康最通常的影响是干扰睡眠。睡眠是使人的新陈代谢得到调节，使大脑得到休息，从而使人能恢复体力和消除疲劳的重要生理活动。在影响人睡眠的外界因素中，噪声列为首位。人从睡眠中醒来，最先恢复的功能是听觉，就是证据。连续的噪声会使人熟睡的

时间变短，因而降低了睡眠的质量，使人的大脑得不到充分的休息，体力得不到恢复。研究表明声压级为40dB的连续噪声可使10%的人的睡眠受到影响，70dB的噪声则使50%的人受到影响。突发的、40dB的噪声能使10%的人惊醒，60dB的噪声则会惊醒70%的人。

噪声污染还会损伤人的听觉器官。人在噪声中生活和工作，其听力会下降，即产生听觉疲劳。人长期接触噪声，会造成听觉器官的器质性损伤。国际标准化组织（ISO）和美国劳动保护部门统计结果认为，人在80dB以上的噪声环境中工作40年后（每天工作8h），噪声每增加5dB，噪声性耳聋的发病率增加约10%。在突发性的强噪声作用下（如爆震，声压级为150dB），人的听觉器官会发生外伤（耳膜破裂等），出现爆震性耳聋。近年还有研究表明，在强烈噪声环境中（90dB以上），人的视觉也会疲劳：对弱光反应迟缓、眼痛、眼花、流泪等。

表7-11　在噪声环境只工作40年①后，噪声性耳聋及听力损伤的发病率

工作环境噪声的声压级，dB	噪声性耳聋发病率，%	听力损伤者所占比例，%
80	0	33
85	10	43
90	21	54
95	29	62
100	41	74
105	54	87
110	62	95
115	64	97

注：资料引自《中国大百科全书，环境科学卷》，1998年版。

①工作年限＝年龄－18。

噪声污染还会损伤人的神经系统。长期的噪声会使人的兴奋和抑制失调，出现头痛、耳鸣、多梦、失眠等症状，使人的记忆力减退，注意力不集中，还会引起人的植物神经功能紊乱，使人的血压不稳定，心率改变，消化系统功能减弱。噪声对婴幼儿的心脑功能发育有不好的影响，在噪声环境中的儿童，其智力发育水平要比在安静环境中的儿童低20%。噪声导致胎儿发育不良的事例也有报道。

噪声还会对人际交往中的语言清晰度产生影响。在噪声强烈、嘈杂的环境中，人们往往听不清楚正常交往所需要的声音。在噪声环境中进行人际语言交流，发话人需要放大声音，受话人才能听得清楚。有研究表明，房间内有噪声时，噪声每增加10dB，发话人说话的声压级要增加3～7dB，才能使在1m距离上的受话人听清楚说话的内容。通常在噪声声压级为65dB时，人们在打电话时就听不清对方的说话，在噪声声压级为80dB时，则很难进行交谈。

三、世界和中国的大城市噪声污染

国内外的资料都表明，噪声污染是居民反应最强烈的环境问题。1966年日本“公害”诉讼的29502件案件中，噪声案件为7640件，占37.3%；1974年噪声诉讼案件增加到20972起；1977年增加到8万件以上。美国约有8000万人，即人口总数的约40%受噪声的

严重干扰，其中有约4000万人处在听觉受损害的强噪声威胁下。英国的伦敦、利物浦等大城市，有76%的居民受到噪声的严重干扰。就连过去以安静著称的北欧名城斯德哥尔摩，目前也有约70%的居民受到噪声的干扰。

在中国噪声污染（俗称“噪声扰民”）也相当严重。据1978年统计，我国工人有10%～30%处在听觉受损的强噪声环境下工作。根据生理学和心理学的研究，1980年提出了环境噪声允许范围，1982年提出城市区域环境噪声标准（1993年提出修订标准）。

表7－12　我国环境噪声允许范围

适　用　条　件	最大值，dB	理想值，dB
体力劳动（听力保护）①	90	70
脑力劳动（保证语言清晰）	60	40
睡　　眠	50	30

①美国环境保护局（EPA）1975年提出的听力保护标准是：75dB（8h）；70dB（24h）。

表7－13　城市各类区域环境噪声标准①　　单位：等效声级，dB

适　用　区　域	白天（6：00～22：00）	夜间（22：00～6：00）
特殊住宅区	45	35
居民区、文教区	50	40
一类混合区	55	45
商业中心区，二类混合区	60	50
工业集中区	65	55
交通干道两侧	70	55

①资料摘引自《城市区域环境噪声标准（GB 3096—93)》。

我国城市噪声的重要噪声源是交通噪声。有统计表明，20世纪80年代中期～90年代中期，我国大城市交通干道两侧的噪声约72dB。80%的大城市交通干道两侧的噪声超过国家标准。广州、上海、大连、深圳、厦门等城市交通干道两侧的噪声达73dB，温州道路两侧噪声达82dB。上海西藏路中百一店附近交通噪声达91dB，有人认为这是世界上最喧闹的街道。我国最大的工业区大庆主要交通干道总长131.6km，平均路面宽度23.5m，平均机动车流量1349辆/h，31条主要道路的噪声均值范围是64.8～71.8dB，交通噪声的年平均值是69dB，总长为62.7km的9条道路的噪声超过国家标准规定的70dB，即有近一半（47.6%）的干道交通噪声超标。交通噪声在城市噪声中的质量密度达32.1%。

北京在1975年仅有6万辆机动车，但由于不禁止鸣笛，交通噪声高达74dB，1976年上升为76dB。1978～1981年，机动车数量增加了一倍，但由于交通管理、道路建设有所改善（例如限制鸣笛），交通噪声还降低了3dB。但北京的城市噪声污染仍是严重的。到1998年底，北京市人口已达1300万人，机动车135万辆；有81座桥，11段高架路。有21座桥附近的交通噪声超标（要说明的是，日本的东京机动车保有量为200万辆以上，约是北京的两倍以上，但繁华地区的交通噪声仅64dB，比北京低；美国纽约的机动车数量是北京的6倍，但城市交通噪声仍低于北京。到2000年底，北京市机动车数量已达到150.7万辆，市区经

认定的要进行噪声监测的道路303条，总长485.4km，市区建成区道路的车流量从1996年的3044辆/h，1998年的3670辆/h增加到2000年的3907辆/h，但交通噪声稳定在71dB，由此可见，机动车的车况和城市交通管理也是影响城市噪声的重要因素)。

表7－14　北京各类交通桥梁附近的交通噪声

桥梁种类，典型桥的桥名	交通噪声的等效值，dB
立交桥：阜成桥、复兴桥、玉蜓桥	65－71
跨线桥：航大桥、北太平桥	68－77
转盘桥：安定门桥	72
跨河桥、铁路桥：永定门桥	70

注：资料引自北京市环境保护研究所的研究报告。

表7－15　北京二环路、三环路附近的交通噪声

区　　域	等效噪声（6：00－22：00），dB	等效噪声（22：00～6：00），dB
二环路两侧	74.3	72.2
二环、三环路中间	72	65
三环路两侧	78.2	76

注：资料引自北京市环境保护研究所的报告。

从表7－14、表7－15可见北京市主要交通通道附近的噪声都超过《城市区域环境噪声标准》的规定值。在北京市的噪声构成中，交通噪声占21.4%，生活噪声占69.5%，工业噪声占4.7%，建筑施工产生的噪声虽然只占42.%，但夜间施工扰民严重。从20世纪70年代以来，噪声就是居民投诉的的中心点，1977年北京市居民向环境保护部门反映环境污染的投诉中，噪声案件占40%。1978～1990年环境保护部门收到人民群众反映环境污染的来信中，涉及噪声污染的占50%左右；1998年群众反映环境污染的8436件信访中，涉及噪声污染的有4718件，占55.9%，居首位。

在大城市附近，飞机和机场噪声是重要的噪声声源。飞机在起飞、飞行、降落和地面试车时，都会发出强烈的噪声，产生的噪声有螺旋桨推进器的噪声、喷气式发动机排气噪声、风扇噪声。另外，在高速飞行的飞机的外壁的边界层内，会产生强烈的压力变化，这叫做“附面层压力起伏”，这种压力起伏并不以声波的形式向外传播，但在飞机机体（机舱）内会产生噪声。附面层压力起伏约与飞行速度的2.75次方成正比。在飞机飞行速度接近或达到声速时，由于喷气口发出的噪声已经不能到达喷气口前方的机身部位，此时附面层压力起伏引起噪声成了飞机内唯一的噪声声源。实验测量表明，附面层压力起伏的主要频段为600～10000Hz；飞行高度和温度对附面层压力起伏的影响不大，但飞行高度较高时，附面层压力起伏比在飞行高度低时要小。附面层压力起伏和发动机种类、飞机型号、飞机尺寸无关，因此降低机舱内噪声的主要方法是改善机身壁面的的隔声和吸声结构。机场噪声是机场上所有飞机及其他设备噪声的总汇，与飞机的机型和起降次数有关。飞机的噪声会引起飞机机身材料的声疲劳，从而影响飞机的寿命和飞行安全。飞机噪声还影响飞机上的设备的正常工作和机组人员、乘客的舒适与安全，尤其是长时间飞行，机舱内噪声对乘客生理和心理有明显的

影响：使人疲惫，反应迟钝。另外还会对机场的地面工作区和附近居民区产生噪声污染。

表 7-16　一些民航客机的噪声

机　　型	B727、B737，DC-9	B707，B720，DC-8	DC-10	B747
种　　类	近程、中程	中远程	中程	远程
载客量，人	100	150	250	365
航程，km	400～2400	1600～6400	1600～4000	3200～9800
噪声级，dB				
降　　落	85～90	94～100	84	92
起　　飞	94～100	100～105	90	103
舱　　内	77～92	76～85	72～84	72～84

注：资料引自《中国大百科全书，环境科学》1998年版。

四、城市噪声的传播特性

城市中噪声在其传播过程中会因传播距离的增加而减弱，其原因有两个方面，一是由于噪声波阵面的几何扩展，致使单位面积上的噪声声压、声强或能量（声功率）减弱。在与噪声源的距离远大于噪声源几何尺寸的条件下，可视噪声源为点源，噪声波阵面可视为球面，此时声功率（或声强）与传播距离的平方成反比，而声压则是随传播距离的增加，按距离的一次方规律衰减，即按反比规律衰减（因为声强或声功率与声压的平方成正比）。此时与噪声源的距离增加一倍，声压级降低6dB，即声压级的降低量与传播距离成正比。声波在空气中传播时衰减的另外一种原因是，空气分子对声波的物理吸收所引起的衰减，这种变化（减弱）（声压和声功率的减弱）是按照负指数规律衰减。空气中声波的衰减可视为两种物理过程：一是空气的粘滞性、声波传播过程中空气疏密部分间的热传导所引起的吸收；另一种是空气中氧分子振动的弛豫效应所引起。这两种物理衰减都与声波的频率呈增函数关系（第一种衰减与声波频率的平方成正比；第二种衰减随频率增加的变化较为复杂）；这两种物理衰减还和空气的温度有关，第二种衰减还和空气中的水蒸气含量（相对湿度）有关。综合这两种物理吸收过程，大体上说，声波的衰减随频率的增加而变大，即高频的噪声更容易衰减。温度的变化时声波衰减的规律比较复杂，但大体上有随温度升高，声波衰减变小的趋势，但在个别温度下，声衰减明显，并不服从上述规律。在声波的频率和空气的温度一定时，随空气的相对湿度增加，声波的衰减呈减小的趋势（但在个别点上衰减增加）。

噪声的传播方向还会随空气的温度变化而改变。空气中的声速与空气绝对温度的平方根成正比，因此温度高的区域，声速稍高。在空气温度随海拔高度增加时，声速也随高度增加而变大，此时声波传播方向将向地面弯曲（见图7－4（a）），此时在地面附近声源发出的声音，可沿地面传播到较远的地方。在城市的夜晚，由于地面的热量弥散到空中，随高度的增加，空气温度升高，空中的声速高于地表，声波的传播方向向地面弯曲，声波可以传播到较远的地方。这就是为什么在静夜中能听到远处声音的原因（夜晚噪声背景值低，比较安静也是一个原因）。

在白天，由于地面接受到的热量辐射较多，地面附近的温度高于空中，因此空中的气温低于地面附近，所以在空中，声速低于地表，此时声波的传播方向向空中弯曲（见图7－4

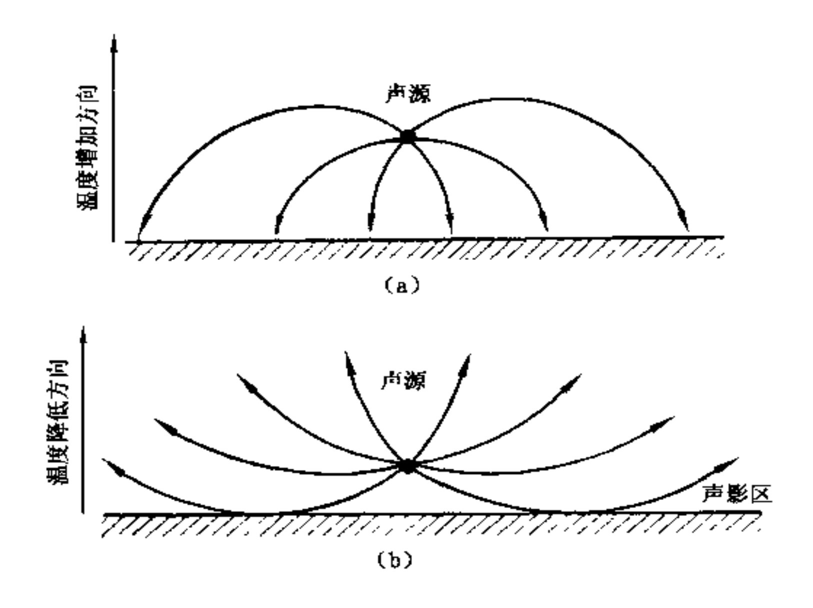


图 7－4　空气温度对声波传播的影响

(a) 夜晚；(b) 白天

(b))，在地表附近的声源发出的声音，在距离声源的一定距离上掠过，并形成声影区。因此在白天，地面附近的声音传播不远。

风速分布对声波的传播也有影响，当声波顺风传播时，声音的实际传播速度应是声速和风速叠加，又由于空中的风速高于地表，因此声波传播方向向地面弯曲，声波可传播较远。而在声波逆风传播时，空中声波的传播速度要比地面低（空中声波的实际传播速度是声速减风速，而空中的风速大于地面），声波的传播方向向空中弯曲，声波传播距离比顺风时近得多。

若噪声的形成与气流运动有关（如喷气式飞机的发动机），则噪声的频率与气流的速度成正比。另外噪声的声压级与气流速度的 8 次方成正比，这是喷气发动机尾部噪声对人耳的刺激远大于管线漏气时产生的噪声的主要原因。

五、城市噪声的控制

与空气污染、水体污染和固体废弃物污染不同的是，噪声污染是局部的和没有后效性的，只是在空气中产生的物理场暂时性的变化。一旦噪声源停止输出和阻断噪声传输通道，噪声污染立即消失，而且不留任何残余。

对城市噪声的控制，应该包括两个方面，一是用技术措施控制噪声声源、阻断噪声传播通道，并对在噪声环境中工作的人们提供保护措施。另外，更为重要的是制定控制噪声的行政法规，对城市不同区域按功能进行噪声控制。但不论那种措施，都应以对噪声的调查为前提。

对城市中由机械设备、交通工具引起的噪声声源的控制，有两种途径：一是改善设备的机械结构，提高主要产生噪声的部件的加工精度和组装质量，采用高合理的操作方法，用以降低噪声输出的功率。二是利用吸声、隔声、减振、隔振、安装消声器等措施来控制噪声的输出。例如对用普通齿轮传动的设备若改用有弹性轴套的齿轮，可降低噪声 15～20dB；把锻、铆改为焊接和摩擦压力加工，可使噪声降低 30～40dB。对几种常见的噪声源采取控制

措施后其效果见表 7－17。

表 7－17　常见机械噪声源、控制措施及效果

噪声声源	控制措施	降噪效果，dB
管道振动	包覆、使用阻尼材料	3～20
机壳振动	包覆、安装隔离罩	3～30
整机振动	加隔离机座（弹性耦合）	10～25
齿轮啮合	加隔声罩	10～20
进气口、排气口	安装消声器	10～30

注：资料摘引自《中国大百科全书，环境科学》1998 年版。

对于交通噪声，例如汽车，可使用低噪声的、有定向特性的喇叭，其正面方向声压级可达 105dB，在其侧向，声压级衰减 20dB。再例如北京站至北京南站（永定门站）每天火车流量 160 列，列车通过时，平均噪声约 80dB，1987 年将这一段长 8.5km 的铁路全部更换为长轨，噪声有一定程度的下降。

对声波传播通道的技术控制的基本思路是：噪声随其传播距离的增加而减小，因而可使噪声源置放在较远的地方。另外，噪声源往往有指向性，即在某个或某些方向上噪声辐射较强，尤其是频率较高的声波信号，其指向性更明显，因此在需要安静的环境时，要考虑附近噪声源的放置方向。在噪声源和生活、工作区域之间，还可建立隔声屏障，可利用天然的地形、地物，也可以设置人工的隔声屏障，如高速公路两侧的隔声屏或隔声墙。通常见到的隔声屏是有一层薄铅皮的玻璃纤维布或含铅塑料作成的隔声幕。这种隔声幕比较柔软，容易开闭。用含铅材料是因为铅的密度大，因而声阻抗值大，对声波的反射强烈。这种隔声幕对 500Hz 以上的噪声的降噪作用在 15dB 以上。

对在噪声强烈的环境中工作的人，可使用护耳器等防止过强的噪声进入人耳。

在噪声污染控制上，某些行政法规往往更有效。如在城市区域禁止放鞭炮，在每年高等学校入学考试期间，禁止夜间施工，都能明显降低城市噪声。北京市从 1986 年 8 月 1 日起，禁止在三环路以内鸣笛（可惜执行并不严格），使市区的交通噪声降低了 1～6dB。

城市的绿化对噪声污染有明显的减弱作用。树木、植物的枝叶、草茸都能吸收声波的能量。绿化的街道比没有绿化的街道城市噪声低 8～10dB。

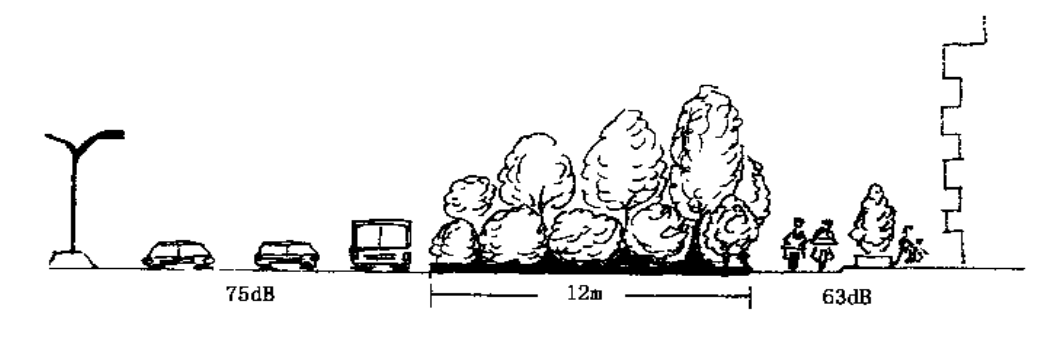


图 7－5　城市街道绿化可降低噪声

小　　结

在大气圈、水圈和岩石圈中声波的传播有各自的规律和特有的声学现象。生态环境中的声污染有自然和人为两种原因。随城市的发展，噪声已经成为居民最关注的环境污染问题。而对噪声，尤其是大城市的噪声防治，涉及技术问题，也有管理等方面的问题。

思考题

(1) 根据你的实际体会，说明噪声污染对生活的影响。

(2) 任何认识和防治城市的噪声？

第八章　环境科学中的光学问题

生态环境中的光学问题研究天然光环境和人工光环境，光环境对人生理和心理的影响，光污染的防治等问题。

光是人眼可见的、波长为380～780nm（$1nm = 10^{-9}m$，nm中文称为纳米）的电磁波，有时也包括人眼不可见的红外和紫外辐射。表8－1是各种可见光的波长和名称。

表8～1　可见光和红外、紫外辐射的波长和名称

波长范围，nm	区域名称	波长范围，nm	区域名称
1～200	真空紫外区	560～590	黄光
200～300	远紫外区	620～780	橙光
300～380	近紫外区	620～780	红光
380～420	紫光	780～1500	远红外区
420～450	蓝光	1500～10000	中红外区
450～490	青光	10000～1000000	远红外区
490～560	绿光		

可见光虽然也是一种电磁辐射，也能辐射出能量，但是光却有许多与不可见辐射不同的特点，最主要是有视觉特征。例如，能量相同但波长不同的电磁辐射给人的视觉是不同的：可以是波长长的红光，也可以是波长短的紫光，甚至可能是在人眼看来是“黑暗”的红外或紫外光。因此，对人眼可见的电磁辐射，规定了发光强度、光通量、照度、亮度（发光率）等物理量。

发光强度I。发光强度是衡量光源辐射可见光能力的物理量。最早的发光强度的标准是（1860年和1881年制定）：鲸脑油制成的直径2.22cm（7/8in）、重75.6g（1/6lb）的蜡烛，在燃烧时每小时烧掉7.78g（3/175lb）时，其水平方向的发光强度为1“烛光”。由于这种标准并没有对周围空气的温度、湿度、空气中二氧化碳含量等影响发光的外在因素和影响发光的蜡烛烛芯的规格（内在因素）加以规定，因此1909年规定以某种特定的电灯为基准，制定发光强度单位，称为“国际烛光”。由于人眼对各种不同波长的可见光的敏感程度是不同的，对波长为555nm的绿光（相应的频率为540×10^{12}Hz或10^{12}Hz）最敏感。因此，发光强度的标准应该对光源的波长（或频率）有规定。1948年第九届国际计量大会通过以在熔点的铂（Pt）发出的光（绿光）为基准，规定新的发光强度单位为candle（candle，原文可直译为蜡烛，当时译为“新烛光”，现在按音译为“坎德拉”）。1979年第十六届国际计量大会重新规定发光强度坎德拉的定义：“一个光源发出频率为540×10^{12}Hz的单色辐射（相应的波长为555nm）在一定的方向上的辐射强度达到每球面度1/635W，则此光源在该方向上的发光强度为1坎德拉（candle或cd）。（说明：半径为r的球面上，面积r^2对球心所张的立体角为1球面度；1/635W的光通量为1lm（流明））。

光通量Φ。光源在单位时间内发出的光能量称为光通量，国际单位制中光通量的单位

是lm，中文名称是流明。lm的定义是：发光强度为1cd的光源在1球面度立体角内发出的光的光通量为1lm。

照度E。照度也叫光照度，表示接受光的表面被照明程度的物理量，定义是单位面积dS上接受到的光通量$d\Phi$，即$E=d\Phi/dS$。照度的单位是lx，中文称为勒克斯，1lx是1lm光通量均匀分布在$1m^2$面积上的照度。实际上，$1lx=1lm/m^2$。

亮度L。亮度也叫光亮度，引出亮度定义的理由是，光源的发光强度通常是对点光源规定的，若光源在观察者看来有一定面积，衡量光源的发光强度就要考虑单位面积上的发光强度，因此亮度的定义是单位面积上的发光强度（照度的严格定义是：在给定方向上，光源表面某点的亮度是包括该点的面积元在垂直于光源发出光的方向上的发光强度与面积元的比值。亮度的单位是：cd/m^2，即单位面积上的发光强度)。

发光强度、光通量、照度、亮度都是光度学的物理量。发光强度I与光通量Φ的关系可表示为：$I=d\Phi/d\Omega$，Ω为立体角，即发光强度为单位立体角内通过的光通量。如果在有限立体角Ω内的光通量Φ是均匀分布的，则发光强度：$I=\Phi/\Omega$。

以下通过一些具体的光源说明上述各种光度学物理量的意义：40W的白炽灯发出光的光通量为$\Phi=350lm$，如果没有灯罩，在4π立体角内（全空间）的平均发光强度为：$I=350lm/4\pi=28cd$，如果在灯泡上方装一个白色搪瓷平盘灯罩，则灯下的发光强度可增加到数百坎德拉。此时，灯泡的发光强度没有变化仅是由于灯罩的反射，在灯泡下方的光通量增大了，另外在距离40W白炽灯约1m的桌面处，平均照度可达200lx。白炽灯的亮度约（3～5）$\times10^6cd/m^2$；太阳的亮度要比白炽灯大约1000倍，可达$2\times10^9cd/m^2$，夏日中午地面的照度可达1×10^5lx（月光下的照度仅几个勒克斯)；普通荧光灯的亮度仅（6～8）$\times10^3cd/m^2$，但荧光灯的辐射面积大，40W的荧光灯的光通量可达2100lm。

第一节　太阳的基本知识

太阳是地球上光照的最主要来源，地球上各种人工光源，就其能量的源头而论都可认为源于太阳。人类早期的光学研究可以说是与对太阳的研究密不可分的，因此本章将首先介绍有关太阳的基本知识。

一、太阳的基本数据

直径和体积。太阳的直径为139万km（半径为695990km，是地球半径的6378km的109倍，太阳的半径是指太阳中心到色球层（见后）底部的距离)，体积是地球的129.5万倍。

质量。太阳的质量为$1.99\times10^{33}g$，占太阳系质量的99.865%，是地球质量的33.25万倍。

物质成分。太阳的物质成分中氢（H）占92%，氦（He）占7.8%；在总量仅占0.2%的其他元素中，氧（O）占43%，碳（C）占30%，氖（Ne）占9.5%，氮（N）占6.3%，镁（Mg）占2.3%，铁（Fe）占0.52%，硅（Si）占0.35%，其余元素占8%。组成太阳的元素成分和地球相近。

太阳辐射。太阳以电磁波的形式向外辐射能量，辐射功率为$3.8\times10^{26}J$（J，中文名为焦耳，1J=1焦耳=10^7尔格，即太阳辐射功率亦可记为3.8×10^{33}尔格)，太阳表面的辐射强度约$8kW/cm^2$，其中可见光约占50%，红外线约占45%，紫外线占5%以下，太阳辐射

的峰值是波长为470nm的青色光区。太阳辐射的电磁波能量中被行星接收到的仅占1/1.2亿。在地球轨道处、在单位面积（以平方厘米 cm^2 为单位）、单位时间（以分钟min为单位）接收到的太阳电磁辐射的能量（以卡cal为单位），即太阳辐射总强度，其数值为（1.96±0.01）cal/（cm^2·m）（cal为热量单位，中文名称为卡，1卡即1cal=4.186J=4.186焦耳），这一数值称为太阳常数（记为 S）。由于太阳辐射直接影响地球的生态环境，因此，太阳常数是个很重要的参数，测定太阳常数随时间的变化是很重要的工作，但测定太阳常数的准确值极为困难。1954年，F·S·约翰逊根据20世纪50年代以前的观测结果，规定太阳常数 S =2.00cal/（cm^2·min）；1957年国际地球物理年时建议 S =1.98cal/（cm^2·min）；1981年10月，世界气象组织建议 S =（1.96±0.01）cal/（cm^2·min），也可记为，地面上每平方米面积（m^2）从太阳辐射所获得的太阳光的功率约为1396W，即太阳常数亦可记为 S = 1396W/m^2，如果扣除地球上大气吸收的能量，地球上每平方米面积所获得的太阳光的功率约1000W。

日地距离。太阳到地球的距离为1.5亿km，即1.5亿km，习惯上记为1个天文单位，光线从太阳到地球的行程时间为8′19″8。

二、太阳的结构

从太阳的中心到边缘可分成核反应区、辐射区、对流区和太阳大气，其结构图如图8-1所示。

1. 核反应区

核反应区的半径约为太阳半径的1/4，体积为太阳体积的1/64。核反应区的体积虽然不大，却集中了太阳质量的50%以上，核反应区的密度达160g/cm^3。太阳上发生的全部核聚变反应的99%在核反应区产生，因此是太阳上发射能量的最主要区域。核反应区的温度可达1000万K，压力达 2.53×10^{10} MPa。

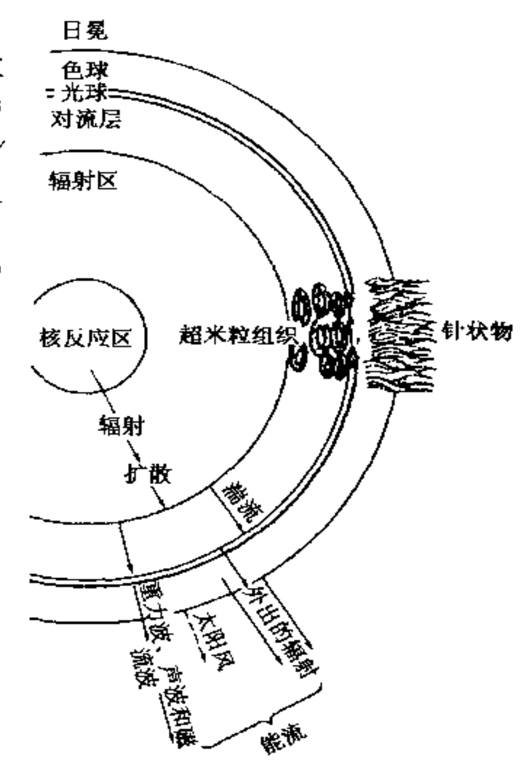


图8-1　太阳结构示意图

太阳的核反应区发生的核聚变反应是：

$4H \longrightarrow He + E$（反应过程中有碳 C_{12} 参加，作为催化剂）

太阳的核反应区每秒钟有6亿t氢（H），由于核聚变反应生成氦（He），在核聚变反应中质量亏损 Δm = 500万t，所亏损的质量全部变成能量辐射（$E=\Delta mC^2$），所产生的辐射首先是γ射线，这些γ射线在与核反应区的其他物质作用，经过几十万年后才变成可见光和红外线辐射出去。按每秒钟消耗500万t氢计算，太阳上的氢至少还能维持上述核聚变反应100亿年，至少还能发光50亿年。

2. 辐射区

辐射区在核反应区的外面，是太阳半径 R 的1/4至4/5处的区域。在太阳核反应区产生的能量在此区以辐射形式传输出去，在辐射区，以对流和传导形式传输的能量极少。

3. 对流区

对流区在辐射区的外面，其厚度约为太阳半径的 1/5，其表面温度约 5770K，对流区是太阳上温度梯度最大的区域。在此区，能量主要以对流的形式向外传输，湍流是对流区传输能量的主要形式，由于湍流运动，此区形成规则的结构，如米粒组织、中等米粒组织、超米粒组织等。能量和物质从对流区的底部以对流的形式运动到顶部约须 1 个月，与太阳自转的周期相近，即太阳的自转对这种大尺度的对流有明显的影响。

4. 太阳大气层

太阳大气层是不均匀的，其温度、密度随其距对流层外表面的高度连续变化，由于太阳大气层温度和密度是变化的，因此太阳大气层并非静止，而是在不停地运动。太阳大气层可分为光球、色球和日冕等层次，不同层次辐射的电磁波的频段有明显差别，但是太阳大气层的各层次间并没有明显的界限。

光球层。是太阳大气层的底层，厚度约 500km，肉眼所见的太阳边缘就是光球层的的外缘，人眼所见的可见光几乎都是由光球层发出。光球层底部的温度为 5500K，光球层的顶部，温度约 4560K。光球层的密度为 10^{-6}g/cm^3，相当于地球大气层 50km 高空处空气的密度，光球层的主要成分是氢（占 90%）和氦（占 9.9%），铁、钙、钠等较重元素的混合物仅占 0.1%以下。由于太阳是旋转的气体星球，因此光球层也在旋转，在太阳两极自转周期约 36d，在太阳赤道区域自转周期仅 25d，不同纬度区域自转速度的差异形成太阳表面的湍流和各种扰动。近年的观测表明，太阳表面每 2h40′发生幅度为 4km 的起伏。

色球层。色球层是从光球层向外延伸到 7000km 处的太阳大气，但在距色球层底部约 2000km 处为过渡层，再向外，太阳大气层的密度更低。色球层底部的温度比光球层低，约 4300K。在距光球层表面约 1000km 处，温度又上升到 100000K。色球层的密度为 10^{-16}g/cm^3，辐射出的光能仅是光球层的 1/1000。色球层在平时是看不到的，在日食时，所看见太阳边缘有一薄层色彩艳丽的辉光，就是色球。色球层表面呈现网络状结构，这种网状结构有周期为 180′震荡，其运动速度为 20～30km/s，这种震荡有助于向外传递能量。同时色球层上经常发现有宽度约 1000km，高度约 100000km 的针状物，可能是色球层向外抛射出的等离子体。

日冕层。日冕层是太阳大气层的最外层，其厚度可达太阳半径的几倍，是极稀薄的高温气体层。通常在日全食才能看到日冕，并可将日冕分为两部分：距太阳表面 0.3R（太阳半径）以内称为内冕，形状近于轴对称的椭圆；距太阳表面 0.3R 以外称为外冕，有许多喷射状的、羽毛状的结构，形状不规则。在距离太阳表面 2R 处，日冕的密度约为 10^{-17}g/cm^3，温度约 10^6K。日冕发出的电磁波辐射几乎是全频段的：从 X 射线、可见光到（相对于可见光）频率较低的电磁波。

三、太阳活动

太阳大气层中太阳黑子、光斑和谱斑、耀斑、日珥出现活动的区域称为太阳活动区，活动的规模约 10 万 km，产生上述太阳活动的原因是太阳大气层下面对流层的运动。

1. 太阳黑子（sunspot）

太阳黑子是太阳大气层的光球层中，局部磁场异常强的区域，即强磁活动产生的气体涡旋，其磁场强度可达几千高斯，温度比光球层的其他区域低 1000～4000K，与光球层其他部位相比，亮度低 1/4～3/4，呈现暗色，因此将其称为黑子。太阳黑子的尺寸约 1000～200000km，出现位置多在太阳赤道两侧的 45°，但在赤道两侧 5°以内少见，多数是在赤道两

侧的 5°～25°以内。通常黑子是在太阳赤道的南北两侧对称出现，成对出现的黑子的旋转方向及磁极性相反。太阳黑子的寿命为几个小时至几个月，太阳黑子活动有 11.8 年的周期，在下一个周期，成对出现的黑子的旋转方向和磁极性反转过来。在每个太阳黑子活动的周期开始时，在太阳的中纬度区域先出现小黑子，随太阳活动增强，黑子变大而且数目增多，达到极大值后，随太阳活动减弱，黑子数目减少，后出现的黑子分布接近太阳的赤道。黑子的活动对地球上的气候、自然灾害、无线电通讯有明显影响。

我国是最早在史料中有黑子记载的国家，《汉书·五行志》记载，汉成帝河平元年（公元前 28 年），三月己未（5 月 10 日）："日出黄，有黑气大如钱，居日中央"。在西方，到 17 世纪初，1610 年，伽里略和法布里修斯（Fabricius）等人对太阳黑子的观测和记录才被承认。

2. 光斑和谱斑

太阳活动区的黑子或黑子群附近有一些形状不规则的白光亮区，叫做光斑。光斑的表面温度比附近光球区的温度高约 1000K。这种高温区延伸到色球层上叫做谱斑。

3. 耀斑

太阳耀斑是太阳大气层中最剧烈的活动，是一种爆发现象，在太阳大气层的某些小区域（最大面积可达日面的 0.5%），亮度会突然增大，在几分钟内达到极大值（亮度增加 10 倍以上），并在几十分钟后恢复正常。耀斑的发生与太阳黑子有关，在黑子的磁场梯度大或黑子群极性复杂时，容易产生耀斑。这种爆发现象往往在半小时内，在局部区域释放出 10^{25}J 的能量，在发生耀斑时，各频段的电磁辐射都增强。某些耀斑会产生大量的高能粒子，但主要是质子，太阳发出的高能质子的能量超过 500MeV（MeV——百万电子伏）时，地球上记录到的高能质子的耀斑事件称为太阳宇宙线耀斑。统计表明，平均每 3 年发生两次太阳宇宙线耀斑。当太阳爆发时发出的质子能量小于 100MeV 时，可进入地球的两极地区。被两极地区电离层吸收，使极地电离层中的分子、原子被反常电离（这种现象称为极盖吸收）。在太阳发出的质子能量为 10MeV 时，极盖吸收达到极大值，发生这种记录到大量质子的事件叫做太阳质子事件，相应的太阳耀斑称为太阳质子耀斑。在发生太阳耀斑时，由于向空间发出大量的高能质子、等离子体等，可影响空间的环境和地球环境：会对宇航飞行产生威胁，还会干扰地面的无线电通讯。因此对太阳耀斑的研究和观测，在理论上有了解太阳和其他天体上的爆发规律和过程的意义，在实用上有保护宇航和无线电通讯安全的价值。

日珥。日珥是太阳边缘高温气体（主要是氢和氦）的扰动（这种扰动可突出日面），日珥区域的密度和温度与太阳色球层的数值相当，比日冕层大得多。日珥在日面上的投影是暗色条纹。平常，日珥难以用肉眼观察，在日全食时，由于太阳光球层被地球的影子遮盖，可用肉眼看到火红色的日珥，其形状似喷泉、浮云等，典型的尺寸是 6000km（长）×40000km（宽）×200000km（高）。日珥作为高温气体扰动，有时相对宁静，有时活动，有时爆发。其活动也有与太阳黑子活动相近的约 11 年的周期。日珥爆发时，抛射高温粒子的速度可达 1000km/s。

4. 太阳风（solar wind）

太阳风是从太阳大气层连续向外流动并被加速到超声速（几百 km/s）的等离子体。1958 年，帕克（N.Parker）提出日冕连续膨胀可产生超声速的等离子流，并首次提出太阳风（solar wind）的概念。在星际空间，彗星经过太阳系时，彗尾背对太阳，证明太阳风作为一种有能量的粒子流是存在的。在地球轨道附近，太阳风的平均速度约 468km/s（高速流

为 702km/s，低速流为 327km/s）；平均密度为 8.7（个粒子）/cm^3（高速流为 3.9/cm^3，低速流为 11.9/cm^3）；主要成分是质子、中子及少量的氦核，质子的平均温度为 1.2×10^5K；电子流的平均温度为 1.4×10^5K；氦核的平均温度为 5.8×10^5K（太阳风的温度虽然高达几十万度的数量级，但由于其密度极低，因此不会引起“烫伤”）。在行星附近，太阳风等离子体极为稀薄，粒子间没有碰撞，粒子的平均自由程远大于行星的尺度，大约在行经 20 个天文单位后因减速而变冷，并扩散在银河空间。

四、太阳活动对地球的影响

太阳的能量以电磁波（包括可见光）和微粒辐射的形式向外发射，这些辐射达到地球时，会对地球的磁层、电离层中低层大气产生影响。在地球轨道附近，太阳对地球的电磁辐射总强度为 1.96cal/（cm^2·min）（太阳常数），这种辐射对地球表面和地球大气层加热，产生大气层的温度垂直分布和大气环流，尤其是对流层中的各种天气现象，这就是太阳对地球的生态环境影响的最重要方面。太阳辐射中波长短于 140nm 的紫外线，则是地球大气层中电离层和臭氧层的主要电离源。另外，太阳的微粒辐射产生的太阳风则对地球的磁场发生作用。太阳辐射对地球的加热、紫外线对地球大气层的电离作用和太阳风对地磁场的作用，是太阳对地球作用的三个主要方面。

问题在于太阳活动，即太阳的能量辐射过程是变化的，因此对地球的作用也将发生变化。太阳活动（能量辐射）的变化是相对于某一种稳态而言的，相对于这种稳态所产生的太阳能量辐射的变化导致地球的地球物理状态从某种基准状态（与太阳的稳态对应）发生变化。这些变化会导致地球上的生态环境的变化，即气候变化和生物圈的变化，以及由此而来的人类活动和农业生产的变化；还会导致地球物理场（如电磁场）的变化，并可能影响到无线电通讯、宇航环境、交通运输等人类活动。由此产生的研究太阳辐射的能量及其变化对地球环境和地球物理场的影响的学科叫做日地关系研究。目前，绝大部分日地关系的研究结果还都只是定性的，远达不到定量的程度。但比较一致的认识是：太阳活动对地球上的电磁场、电离层有明显影响；太阳活动与气候、生物圈的关系则是最活跃的研究领域。

1. 太阳活动对地球物理场和地球物理现象的影响

太阳耀斑的影响。前已述及，耀斑是太阳大气层中最剧烈的活动，是能量的突然释放过程。出现耀斑时，太阳的电磁辐射加强，地球大气层的电离程度加剧，可成为磁暴的先兆，并会影响无线电通讯。

紫外线的影响。波长为 175～241nm 的紫外线能在地球大气层产生臭氧。根据 1934～1974 年的臭氧观测资料分析发现，地球大气层中的臭氧含量约有以 11 年为周期的变化趋势，在太阳黑子极大年后的第 4 年前后，地球大气层中的臭氧含量出现极大值。而臭氧层可使地球上的生物免受紫外线的直接照射，是地球上生命现象的重要条件之一。地球大气层在接受太阳紫外线辐射产生臭氧，在臭氧层形成后也会吸收地球的热辐射，这些过程产生的热能最终都会对地球大气层的热平衡过程发生影响。由于地球高空的大气吸收紫外线而被加热，也会使其密度发生变化，而这种变化是与紫外线辐射的变化一致的。例如，太阳活动极大的 1958 年，700km 高空处的大气密度是太阳活动极小的 1963 年的约 40 倍。在同一年内，太阳黑子多时，高空大气的密度也比黑子少时要大。与太阳紫外线强度的 11 年周期和 27d 周期同步，高空大气的密度也有 11 年和 27d 变化的周期。

太阳黑子的影响。太阳黑子数目是衡量太阳活动常用参数，太阳黑子数目多，说明太阳活动强烈，太阳黑子活动有 11 年的周期，考虑到两次太阳黑子的极性的差异，可认为太阳

活动有22年的周期。太阳的自转的平均周期约是27d（在两极略长，在赤道附近略快），如果太阳上一个局部地区的活动持续27d以上，而这种活动又会在地球上发生影响，则随同样自转，地球上由于太阳局部区域活动发生的影响会以约27d的周期重现。在太阳黑子数目极大的年份，在色球层上经常发生爆发，出现耀斑，使太阳的电磁辐射和微粒辐射都增强，并可诱发地球上的磁暴。

太阳风的影响。太阳风是太阳辐射的具有较高能量的带电粒子，这些粒子到达地球的高纬度地区后，和地磁场作用会在高空（100～350km）大气层中形成极光。

2．太阳活动与地球上气候的关系

太阳活动与地球的气候有无关系，仍是一个有争议的问题。一种观点认为，地球上的气候异常是由于太阳对地球各不同纬度区域加热不同产生的大气环流的异常引起的，如果太阳对地球各不同纬度区域的加热在一年四季的循环过程中不发生改变，就没有气候异常发生。另外，统计结果表明，表征太阳活动的某些现象（如日食）和指标（如太阳黑子数目）和地球大气层的气温、气压、降水、洪涝、大气环流、厄尔尼诺现象和拉尼娜现象、湖面的起伏、冰川的进退，都有一定的关系。另一种观点则认为，气候变化主要发生在地球大气层最底部的对流层，而太阳的电磁辐射，除了可见光、一部分无线电电波及近紫外线外，其余X射线频段的电磁辐射、远紫外线，以及绝大部分太阳粒子辐射，都难以达到大气对流层。此外，太阳活动的时间尺度与地球上气候变化的时间尺度也不一致；太阳活动对地球的影响一般来说，是全球性的，但气候变化和异常则是局部和区域性的。这样，就产生了一个问题：同样是受到太阳活动的影响，为什么某些地区发生气候异常，而其他地区则没有这种异常？还要指出，上述气候异常和太阳活动之间统计关系所依据的观测结果在时间序列上顶多是人类有史以来的记录（姑且不论这些记录是否准确，尤其是古代的历史记录是否符合现代科学记录的标准），与地球上气候变化时间尺度相比，过于短暂。而且，即使是从统计的结果表明与太阳活动有关的局部的气候异常，也难以从全球的角度说明和论证太阳活动和气候变化的一般关系。

换一个角度说，地球上的气候变化就其本质而论，是能量的变化过程，而地球上的能量来源，基本上是由太阳供给的，因此气候变化作为一种能量过程，不可能不受太阳活动的影响。但是，迄今为止，还没有找到太阳活动和地球上气候变化之间的明确、直接关系的证据。总之，日地关系的研究，尤其是太阳活动和地球气候变化关系的研究，不仅还远没有达到定量阶段，甚至在现在的定性阶段上，也还处于统计表述，还没有严格的机理性的证明。

近年来，有研究认为日食及太阳黑子活动与厄尔尼诺现象和拉尼娜现象有一定关系。在发生日食时，日食区和非日食区受太阳辐射加热情况有所改变，致使局部大气对流增加，日食区底层向大气层输送的热量增加，使大气环流发生改变，并依据日食区的地理位置的不同，使赤道附近的海水有规则的流动，产生拉尼娜现象（日食发生在赤道区时）或厄尔尼诺现象（日食发生在极地及中高纬度区）。与之类似的是在太阳黑子活动的峰值年，紫外线和粒子辐射虽然增多，但这些辐射难于达到大气对流层，但由于黑子数目的增加，可能使太阳表面的平均温度降低，而热辐射减弱，使地球赤道和极地的温差变小，大气环流变慢，使赤道附近的东风减弱，赤道附近、东太平洋表面的温暖海水移动缓慢而停留在东太平洋海区，有利于厄尔尼诺现象的形成和加强。在太阳黑子活动的谷值年，由于太阳表面平均温度较高，热辐射变强，赤道和极地的温差变大，大气环流加速，加强的赤道东风将东太平洋表面温暖的海水吹到西太平洋，致使赤道附近东太平洋的海水降温，有利于拉尼娜现象的产生或

加强。这些假说和解释虽然也有几十年的统计资料作为佐证，但由于日食和太阳黑子活动往往同时发生，致使太阳热辐射对地球加温的情况出现复杂情景，很难按一种因素解释厄尔尼诺和拉尼娜现象的成因，而且，仅有几十年的统计资料，对日地关系这样要在大时间尺度上考察的系统，也过于短暂。

3. 太阳活动对生物圈的影响

太阳活动对生物圈的影响是日地关系研究的一个重要方面。从整体上说，地球上的生物的生存繁衍、乃至生命现象所需要的能量（光和热）都直接或间接来自太阳，因此太阳活动的改变必然会对生物的生长、发育，乃至物种的出现和消亡产生影响。从大的时间尺度说，冰期出现带来的寒冷可使某些物种灭绝；从小的时间尺度说，四季变化可使树木产生年轮，气候的变化会使农作物的产量发生变化，还会使鱼类繁殖和回游、昆虫的活动范围发生变化，甚至人体的白血球数目的变化、人体的内分泌活动都似乎与太阳活动有关（人类的“生物钟”现象、时差反应等）。表 8－2 是地球发展历程中生命活动和地球平均温度的关系。

表 8－2　地球上生物活动或行为的时间序列和平均温度

时　　间	生物活动或行为	地球平均温度,℃
2 亿年前	哺乳类动物出现	21.11
6500 万年前	恐龙灭绝	22.78
500 万年前	类人猿直立	15.56
12.5 万年前	智人出现	15.00
1.1 万年前	人类开始农耕	15.00
公元 1550－1850 年小冰期	苏南双季稻绝收	14.86

注：1950 年地球平均温度为 15.47℃，1990 年为 16.50℃。

除了上述太阳活动对生物活动和生命现象的宏观表述以外，太阳活动还对生命活动的微观过程影响。例如，波长为 290～320nm 的紫外线能穿过臭氧层达到生物圈（尽管其强度在经过臭氧层时已经大大减弱），这一频段的紫外线一方面能破坏生物体内的核糖核酸（DNA）和蛋白质，另一方面，人体产生维生素 D 和植物进行光合作用也需要这一频段的紫外线。这部分紫外线到达地面的强弱则与臭氧层的厚度或大气层中臭氧的含量有关，而大气层中臭氧的含量是受太阳活动控制的。从这一事例可见，太阳活动对地球上的生命过程有直接的影响。

不同波长的太阳辐射对农作物的生长的影响是不同的：波长大于 1000nm 的红外辐射不参与光合作用，只能产生热；波长为 720－1000nm 辐射（主要是红光）能促使植物的茎伸长；波长 610～720nm 的辐射（橙色光）被叶绿素吸收最多，光合作用最强；波长 510～610nm 的辐射是光合作用的低效区；波长 400～510nm 的辐射（青—绿色光）是光合作用的次高峰区，叶绿素和黄色素对这一频段辐射的吸收最强；波长 315～400nm 的辐射可使农作物的植株变矮，叶片变厚，多数昆虫对此频段的辐射有趋光性；波长 280～315nm 的辐射（紫外线）有明显的杀菌作用，对农作物有害；波长小于 260nm 的辐射都对植物有杀伤作用。

还有些生物活动和生命现象是间接受到太阳活动的影响。例如，在第五章中提到过的人类心血管疾病的发病率与磁暴的出现有关，某些生物酶在磁暴期间的活性降低，有些动物的心脏在频率为 0.1～1Hz 的超低频电磁场作用下，节律会发生变化。而磁暴和地磁场的变化往往由太阳爆发时产生的太阳风所引起。这些，应看做为太阳活动间接影响生物和生命活动

的例证。

还要说明，太阳和太阳活动对人类活动，即不仅对创造物质财富的生产活动有影响（如农事活动的次序和每日的作息时间——日出而作、日落而息），而且对人类的精神活动都有极为深刻的影响。从人类的原始时代开始，太阳就被作为神来崇拜，认为太阳不仅是光明、温暖、力量的代表，还是战胜黑暗和死亡的象征，太阳神几乎是所有民族的神话中最受欢迎和崇敬的神祇（当然，将人或领袖神化为太阳则是对人类美好愿望的蒙昧和异化）。人类科学知识的发展与对太阳的研究是密不可分的：任何人都对有关太阳的知识感到兴趣；科学家则从太阳和地球运动的观察，划分了四季，规定了节气，制定历法，不仅努力去理解和说明在太阳照耀下看到的一切，还更努力地去猜想和研究看不到的一切；艺术家则从太阳的光辉里看到一切和谐和美好的根源。可以说，太阳对人类精神活动的精神影响将伴随人类活动的始终。

五、我国的阳光资源

穿过大气层到达地球表面的太阳辐射，包括直射光和散射光称为太阳总辐射。其中波长为400～760nm（可见光范围）的太阳辐射可被植物体内的叶绿素吸收，参与光合作用，是地球上生命现象的重要过程。绿色植物中约90%～95%的干物质是由光合作用产生的，因此阳光资源是重要的气候资源。以下仅以太阳总辐射和日照时数这两个参数考察我国的阳光资源。

中国年阳光总辐射量的变化范围为90～190kcal/cm^2，140kcal/cm^{2}的等值线从内蒙、华北向西南至西藏高原将全国分成两部分：西部高值区年均值大于140kcal/cm^2；西部的太阳总辐射呈现南高北低，青藏高原是我国太阳总辐射值最高的区域，大部分地区在150kcal/cm^{2}以上，中心地区达190kcal/cm^2。太阳总辐射值最低的地区是四川、贵州，年均值仅90kcal/cm^2。东部地区年均总辐射量在110～130kcal/cm^2，与美国和日本同纬度的地区相近。图8－2反映的是中国年均太阳总辐射量。

由于季节和气候的原因到达地面的太阳总辐射有明显的季节变化：夏季多，冬季少；春季又多于秋季；大部分地区总辐射的最大值出现在4～8月，其中东北和华北出现在5月，西北出现在6月，江南在7月。在农作物生长旺盛的时间（5～8月）太阳总辐射量约占全年的40%～50%，对农作物生长有利：在北方太阳总辐射在夏季集中，有利于温带单季作物生长；在南方，太阳总辐射周年均衡，有利于双季和多季作物的生长。

我国有41%的国土面积的年均太阳总辐射量为144kcal/cm^{2}以上，为阳光资源丰富的地区；国土面积的29%，太阳总辐射年均值为120～144kcal/cm^2，为阳光资源较丰富的地区；国土面积的24%，太阳总辐射年均值在96～120kcal/cm^2，为阳光资源欠丰富的地区；仅有国土面积的6%，太阳总辐射年均值在96kcal/cm^{2}以下，属阳光资源贫乏的地区。

我国全年日照时间为1200～3400h，其分布大致和太阳总辐射一致：低值区出现在四川、贵州和两广北部，最低的区域日照时数仅1000h；高值出现在西北和青藏高原和新疆北部，最高达3400h；全国大部分地区日照时数为2000～2500h。日照的季节变化明显，夏季多，冬季少，但昆明例外，那里冬季和春季日照长。

应该指出，我国对阳光资源的利用程度还是很低的，除了被动的用于农作物生长外，对太阳能的开发利用还很原始。我国国土东西相距5200km，但只有一个时区（与我国国土跨度相近的美国划分为6个时区），按相同的时间作息，不利于阳光的利用，一度实行的夏时制也“人亡政息”。我国西部重要的阳光资源还没有得到足够的认识和重视。

图 8-2　中国年均太阳总辐射量（$kcal/cm^2$）分布

第二节　大气层和海洋的光学性质及其中主要的光学现象

人类的视觉实际上是对可见光的感知程度，而人对外界信息约有75%是由视觉或眼睛获得的。人眼的瞳孔可随可见光的强弱（或亮暗）进行调节（但这种调节需要一定时间，例如，人从阳光下走进电影院，要经过一段时间才能适应在黑暗条件下辨认物体），因而能在太阳的强光（如太阳）和月亮的较暗光线下（太阳光和月亮光的强度相差约1万倍）看清物体或图像。如长期在弱光下用眼，视力会减弱；长期在强光下用眼，会产生瞬时或永久性的眼睛或视力损伤。为保护人的眼睛和视力，需要研究自然光和人工光源形成的光环境；研究光环境对人生理和心理的影响；研究光污染的危害和防治。本节首先对作为天然光源的太阳和人工光源的光学特性和大气层、海水的光学性质以及在大气层、海水中发生的光学现象做些说明和介绍。

一、天然光源和人工光源

1．太阳的直射光和散射光

太阳作为天然光源，可分为为两部分，一部分为直射光，是随季节（地球公转）及时间（地球自转）有规律变化的平行光，直射光强度大、变化快，直射日光的强度可达2.838×10^{27}cd，这样的强光容易引起反射眩光或室内过热，因此许多建筑物（体育场馆、计算机房、工厂厂房）采取各种措施遮蔽直射光。人们外出活动时的遮阳帽的帽檐主要是遮蔽直射光。但直射光有消毒、杀菌作用，还有促进新陈代谢的作用，因此在医院、幼儿园、住宅等建筑设计中都对直射光有一定要求。另外，在强烈、多变的直射光照射下，大型建筑物才最能表现出其艺术造型的宏伟（如天安门）、典雅（如北京天坛的祈年殿）。甚至许多自然景观也只有在直射光照射下，才绚丽多姿，如北国的雪原，“须晴日”才“红装素裹，分外妖娆”；再如庐山的香炉峰要“日照”，才有“生紫烟”的旖旎，瀑布也才有“飞流直下三千尺”，“银河落九天”的壮观。因此直射光有照明、杀菌的物理、生物效果，还有娱悦身心，陶冶性情的艺术观赏效果。

太阳光的另一部分是整个天空的散射光，直射光经过大气层时被大气中的气体分子、云、尘埃散射就产生散射光。与直射光相比，散射光比较稳定，随时间变化不如直射光明显，而且光线柔和，是建筑物采光的主要自然光源。但是，在不同地区，由于地理位置（太阳照射角度不同，高原和平原的空气密度不同）、各种气象因素（日照率、云量、雾）和空气污染程度的不同，散射光的强弱也不相同。通常用天空亮度表示天空散射光的强弱，天空的亮度与方向和高度有关，散射光造成的天空亮度的计算相当复杂，但大致有以下规律：太阳所在的半个天空（如上午的东半天空，下午的西半天空）比较明亮；太阳的视高度越低（如落日时），天空亮度越低，在与太阳相对的半个天空更明显（如日落时的东方）；偏离太阳方位90°处，天空亮度最小；由于散射光是由于空气分子和气溶胶对直射光的散射而产生的，因此在太阳附近，天空亮度明显增大，而且在空气浑浊时最明显。如果对天空中每一点都规定一个亮度值，则亮度的全天空积分值，就是地面的照度。

在海平面观测时，太阳圆面的亮度可达1.6×10^{9}cd/m^2，月亮圆面的亮度为2500cd/m^2。在地面观测时，晴天的天空亮度可达10000～30000cd/m^2，阴天则降低为4700cd/m^2，浓云迷雾时甚至可降低到800cd/m^2。

2. 人工光源

与天然光源相比，人工光源容易控制，能适应各种特殊需要，而且稳定可靠，不受地点、季节、时间和气象条件的限制，尤其是在天然光难以照到的地方（如地下坑道、水下），人工光源是唯一可用的光源。

1879 年爱迪生发明的电灯问世后，开始了以电光源照明的新时代。现代人工照明的电光源分为白炽灯和气体放电灯两类，白炽灯是将灯丝加热到高温，使之发光的光源，因此也可称为热辐射光源。气体放电光源是利用某些元素（如汞、钠）原子被激发而产生光辐射的光源，也称为冷光源。气体放电灯又按其所含气体的压力分为高压气体放电灯和低压气体放电灯。近年来，国际上有生产厂家将气体放电灯的发光管壁的功率负荷进行分类，凡管壁负荷大于 $3W/cm^2$ 的称为高强度气体放电灯（HID）。图 8－3 是电光源的分类图。

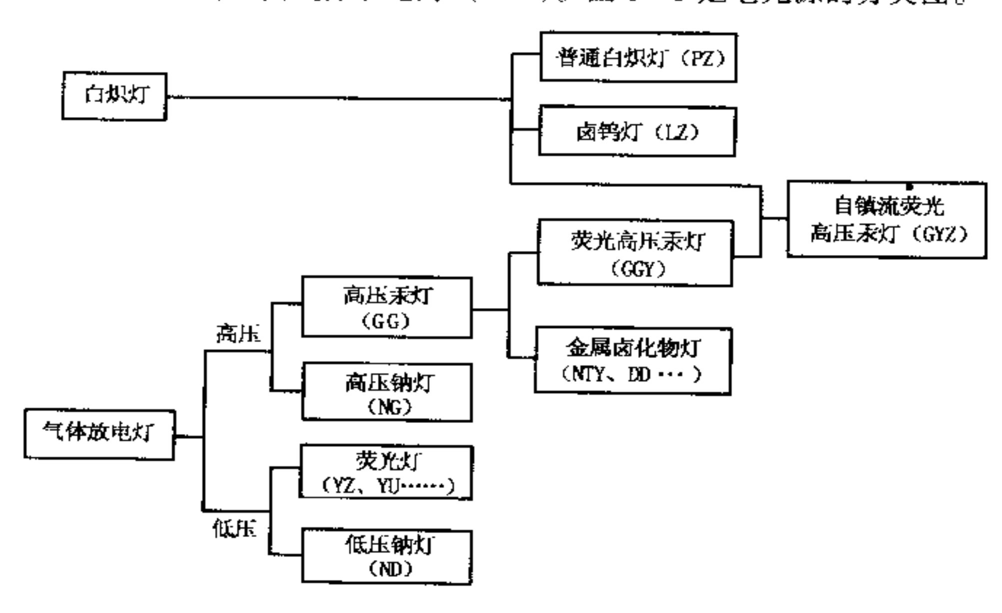


图 8－3　电光源的分类

电光源的主要特性指标是：

光通量。表示灯的发光能力，以 lm 值表示。例如，一只球径 55mm、泡长 105mm 的 40W（110V）白炽灯的发光能力是 470lm，一只球径 60mm、泡长 108mm 的 100W（110V）的白炽灯的发光能力是 1450lm。

发光效率。光源消耗单位电功率所产生的光通量，单位为 lm/W。发光能力强的光源，发光效率高。例如，上例中，40W 的白炽灯的发光效率是 11.8lm/W；100W 的白炽灯的发光效率是 14.5lm/W；300W 的白炽灯的发光效率是 17lm/W；而 5W 的白炽灯的发光效率仅 6lm/W。气体放电的荧光灯的发光效率比同样功率的白炽灯的发光效率高约 3～4 倍。

使用寿命。对白炽灯和荧光灯在使用过程中发光能力（按其光通量值计算）减弱到设计额定值的 70%（或 80%）时的实际使用时间，这是电光源的有效寿命。对一批高强度气体放电灯，在试验过程中有 50% 失效（另外 50% 保持完好）的时间称为这批灯的平均寿命。

色温。按照物理学的概念，在绝对零度以上的任何物体都会由于其内部分子的热运动而辐射电磁波，而辐射出的电磁波的波长（或频率，在可见光范围内是光的颜色）与辐射体的

温度有关（基尔霍夫定律），也和物体本身性质有关。例如，白炽灯的钨丝在加热到500℃时发出的光近于红色。而加热到2000℃时，不仅更加明亮（辐射的电磁波的总能量增加），而且光的颜色也变成橙色，甚至近于白色（波长变短，频率升高）。在一定温度下，物体所发出的电磁波的波长（或频率，在可见光范围内是光的颜色），可用与之等效的黑体的温度来表示，这就是色温。例如，100W的白炽灯发出的光的颜色与黑体在2600K时发出的光的颜色相同，该白炽灯的色温就是2600K。色温越高，电磁波的频率越高，光的颜色越近于青紫色（冷色），色温越低，则光的颜色越接近红色和橙色（暖色）。习惯上认为，色温低于3300K的光线为暖色；色温为3300～5300K的光线为中间色；色温大于5300K的光线为冷色。例如，上午10点钟左右的阳光的颜色和黑体在5600K时辐射的光的颜色相同，该时刻的阳光色温即为5600K。以下是一些光线的色温和常见电光源的特性：

日出时的阳光，色温，1850K；

薄云遮日（均匀），色温，6400～6900K；

蜡烛火焰，色温，1850～1920K；

碘钨灯，色温，3200K。

表8－3　常见电光源的特性

电光源种类	功率，W	发光效率，lm/W	寿命，h	色温，K	用途
白炽灯	15～1000	6.5～20	2000	2800	一般照明
卤素灯	500～2000	16～21	2000	3000	投光照明
昼光色荧光灯	6～125	72	10000	6500	一般照明
白色荧光灯	6～125	50～82	10000	4500	一般照明
高压汞灯	125～1000	40～65	12000	4100	公园，广场，体育场
金属卤化物灯①	80～2000	70～90	9000	6000	体育场馆，摄影棚
高压钠灯	70～1000	90～120	12000	2100	广场，道路
低压钠灯	18～400	150	9000	1800	道路

①金属卤化物灯又称镝灯。

目前世界每年生产数千种规格的电光源百亿只以上，人工照明消耗的电力占总发电量的10%～15%（1983年，我国照明用电占总用电量的8%，1993年上升到10%，目前照明用电约占总用电量的11%左右）。电光源的主要缺点是能源利用效率低：由电能转换为光能的效率仅约10%，由初级能源（燃料等）转换为光能的效率仅有3%。因此发展各种高效率的电光源，以降低能源消耗，达到减少污染，保护生态环境，在某些国家称为“绿色照明计划”。1991年美国环境保护署首先提出绿色照明计划，建议在所有重要场所安装高效节能的照明设备，减少各种照明设备对用电量的需求，预计计划实施，可节省照明能源的一半，相当于4300万辆汽车排放的尾气总量。有研究认为，将我国现有的白炽灯的1/5改换为高效节能灯，其节电量相当于葛洲坝水电站一年的发电量。

有些电光源在接通电源后要经过一段时间才能达到足够的亮度，即启动时间较长。有的电光源，如金属卤化物灯（镝灯）在切断电源后，要等光源冷却后才能启动，不能立即重新接通电源启动。还有些电光源虽然效率高，但色温过高，使人眼并不舒适，而且诱虫；某些高效电光源的成本较高，这些都有待改进。

二、大气层的光学性质

1．大气能见度

大气能见度是衡量大气光学性质的重要参数。大气能见度是视力正常的人能从背景（天空或地面）中识别有足够尺寸的目标物的最大距离 R，称为能见度。

白昼能见度 R 在白昼，假设目标物的视亮度为 L_t，背景的视亮度为 L_b，两者的差异可用对比值 C 表示：

$$C = |(L_t - L_b)/L_b| \quad L_b \neq 0 \tag{8-1}$$

人眼对远处足够大的物体能分辨的最小亮度对比值，称为对比感阈，记为 ε，对视力正常的人，对比感阈 $\varepsilon = 0.02$，即目标物和背景的视亮度有 2% 的差别，正常人的肉眼即可分辨。对视亮度 L_t 一定的目标物，距离人眼越近，对比值越大，而距离增大时，对比值 C 将减小，这就是人眼对近距离处的目标物看得清，而看远处模糊的原因，换言之，对比值 C 是人眼到目标物距离 R 的函数，当距离 R 增大到对比值等于对比感阈 $C(R) = \varepsilon = 0.02$ 时的相应的距离 R，就是白昼时的大气能见度。

能见度还和大气污染程度有关，在大气沿水平方向均匀的条件下，白昼的水平能见度 R 为：

$$R = 1/\mu \cdot \ln[L_b/L_h(C/\varepsilon - 1) + 1] \tag{8-2}$$

式中 μ——水平方向大气的消光系数（详细说明见后）；

L_b——背景的视亮度；

L_h——水平方向天空的亮度；

C——由式（8－1）定义的目标物和背景视亮度的对比值。

在地平线附近，以天空为背景时，有 $L_b = L_h$，$L_b/L_h = 1$；若目标物为黑色，则 $L_t = 0$，此时式（8－2）可简化为：

$$R = 1/\mu \cdot \ln(1/\varepsilon) \tag{8-3}$$

在式（8－3）中，记 $\varepsilon = 0.02$，则水平能见度为：

$$R = 3.912/\mu (\mathrm{km}) \tag{8-4}$$

从式（8－4）可见，水平能见度与表征污染程度的消光系数 μ 成反比，即空气越浑浊，消光系数 μ 越大，能见度越低。在可见光频段，通常用波长为 550nm 的绿色光的消光系数表示可见光的平均消光系数（大气中的消光系数随可见光波长的减小——频率增加而增大）。

夜间能见度 V。夜间能见度和白昼能见度并不相同。从人的视觉特性说，在夜间目标物和背景的视亮度都大为减小，而且，夜间人眼对亮度和色彩的对比感觉都比白昼迟钝，因此不用目标物和背景的亮度对比值作为能见度的标准。在夜间，人眼对微弱的光源相当敏感。夜间，某一光源能否被人眼发现，取决于光源强度为 I 的光源在距离该光源为 r 处产生的照度 E：

$$E = I/r^2 \cdot e^{-\mu r}$$

若 E_s 为人眼的照度感阈，则相应的夜间能见度 V 可由下式计算：

$$E_s = I/V^2 \cdot e^{-\mu V} \tag{8-5}$$

从式（8－5）可见，夜间能见度 V 与光源的强度 I 及大气的消光系数 μ 有关，光源越强（I 越大），能见度越大；大气的消光系数 μ 越大，则能见度越低。在大气消光系数相同的条件下，白昼能见度与夜间能见度的关系为：

$$R = (V\lg\varepsilon)/(\lg E_s - \lg I + 2\lg V) \tag{8-6}$$

大气的能见度分为 10 级，见表 8－4。

表 8－4　大气能见度等级

能见度级别	能见距离，m	能见度级别	能见距离，km
0	0～50	5	2～4
1	50～200	6	4～10
2	200～300	7	10～20
3	500～1000	8	20～50
4	1～2000	9	>50

2．大气中光波的散射、吸收和消光系数

光波在大气中传播，由于受气体分子和气溶胶分子的散射和吸收，其强度要减弱，这就是大气消光或大气衰减（太阳光在大气层中的传播，由于同样距离地球很远，可作为平面波对待；对人工光源，由于其尺寸有限，在距离足够远处，也可视为平面波，因此在未作特别说明时，一般不考虑光波在大气层传播时的几何衰减）。由于大气对光波的吸收和散射，光波在传播过程中的强度按以下规律衰减：

$$I(r) = I_0 \cdot e^{-\mu r} \tag{8-7}$$

式中　$I(r)$ ——传播距离为 r 时的光波强度；

I_0——传播距离为 0 时的光波强度；

μ——大气的消光系数。

传播经过距离 r 后，光波强度 $I(r)$ 和传播距离 $r=0$ 时光波强度 I_0 的比值，称为大气透射比（或大气透射率），记为 $T(r) = I(r)/I_0 = e^{-\mu r}$，表示光波在穿过厚度为 r 的大气后的强度，在沿垂直方向传播时，也称为大气透明度。

大气的消光系数 $\mu = \mu_m + \mu_p$

式中　μ_m——大气分子的消光系数，在海平面上，波长为 550nm 的光波的消光系数 $\mu_m = 0.0116/\text{km}$；

μ_p——大气中气溶胶的消光系数，气溶胶的消光系数比大气分子的消光系数大得多，与大气的浑浊程度有关。

大气分子和气溶胶的消光系数都和光波的频率（波长）有关，频率越高，消光系数越大。大气分子的消光过程主要是与光波频率 4 次方成正比的瑞利散射。气溶胶的消光作用比大气分子的消光作用更明显，与大气中水蒸气、臭氧含量比例等多种影响光波在大气中的折射的因素有关。

大气层对太阳光的散射是普遍而重要的现象，人眼看到的光主要是散射光，如果没有散射，则除了太阳光直接照射的区域外，其余区域是一片黑暗。大气对太阳光的散射减弱了太阳光的直接照射，还由于对各种频率的光波的散射量不同，使人眼看到的天空在不同的情况下呈现不同的颜色。

当大气中各种粒子（空气分子和气溶胶粒子）的尺寸比光波的波长小很多时，通常要求粒子的半径 r 比光波波长 λ 小 60 倍以上（等效为球形的粒子的周长比波长小 10 倍，即 $2\pi r$

<0.1λ)，光波在大气中的传播要发生与光波频率4次方成正比的瑞利散射。在大气中存在尺寸较大的粒子时，发生所谓“米散射”（由德国科学家G·米发现，因此以其姓氏命名），此时散射强度比瑞利散射强得多，但不再与光波频率的4次方成正比。

太阳光在大气中发生瑞利散射时，由于散射强度与光波频率的4次方成正比，因此频率较高的紫色光要比频率较低的红光被散射得多。就整个有太阳入射的可见光频段而言，经大气分子散射的光波向高频的短波波段偏移。太阳光的光谱中，辐射能量最大的是波长为450～470nm的青或蓝色频段，由于大气分子强烈的瑞利散射，天空呈现蔚蓝色。由于大气分子的密度随高度增加而下降，在高空由于大气分子数目减少，瑞利散射减弱，天空的散射光颜色逐渐向更高频段偏移：在8km处变成青色，在11km处变成暗青色，在13km处呈现暗紫色，在大气分子已经非常稀薄的21km处呈现黑紫色，再向上，由于大气分子已经极其稀少，对太阳光的散射极微弱，因此除了太阳光直射的极小区域，天空是黑暗的。

如果大气浑浊，即在大气中有较多尺寸较大的气溶胶粒子时，大气对太阳光的散射作用增强，但散射强度随频率的变化远不如瑞利散射（不再是4次方关系），整个天空散射光谱与入射太阳光光谱相比，向高频段的偏移不如瑞利散射明显，因此天空呈现灰白色。另外，在大气非常浑浊时，在太阳周围由于气溶胶分子的强烈散射，这一区域的天空特别明亮，形成日晕圈。

3. 大气中光的折射

光作为一种波在密度不同的介质中传播时，会发生折射，亦即传播方向的改变。光从真空（光速为 c）进入某种介质（光速为 v），其绝对折射率为 $n=c/v$，由于 $c>v$，所以绝对折射率 $n>1$。光从光速为 v_1 的介质进入光速为 v_2 的介质时，其相对折射率 $n_{12}=v_1/v_2$。根据绝对折射率可求出相对折射率，例如，第一种介质的绝对折射率是 $n_1=v_1/c$，第二种介质的绝对折射率是 $n_2=v_2/c$，则光从第一种介质进入第二种介质的相对折射率 $n_{12}=v_1/v_2=(c/v_2)/c/v_1=n_2/n_1$。

光从光速为 v_1 的介质进入光速为 v_2 的介质时，其入射角 θ_1 和折射角 θ_2 的关系按斯奈尔（Snell）定律：$\sin\theta_1/v_1=\sin\theta_2/v_2$，或 $n_1\sin\theta_1=n_2\sin\theta_2$，或 $n_{12}=\sin\theta_1/\sin\theta_2=v_1/v_2$。

光波在不同介质的分界面上发生折射的原因，实际上是速度的改变，介质折射率的大小与介质的光速有关，但实际上决定介质光速的因素是介质的密度。一般来说，密度大的介质光速低，光线从真空进入这种介质时的方向改变更明显。

大气层的密度是随其空间位置不同而改变的，一般来说，随高度的变化比随水平方向的变化明显。因此，光线在可视为密度逐层均匀的大气层中，会发生折射，因而使观测到的目标与目标的实际位置出现误差（这在天文观测和地面观测时都会发生）。例如，人在高处远望时，由于光线折射，看到的地平线和远处的目标往往比实际位置高一些和远一些。在空阔的海滨、雪原上空还能观察到由于距离地平面高度不同的大气因温度不同发生密度差异而使光线折射而出现的海市蜃楼现象。

大气中光波的折射还和光的频率有关，即不同频率（波长或光的颜色）的光的折射率是不相同的，这种现象称为大气色散，例如波长为500nm的黄色光与波长为400nm的紫色光在经过较长的光路后（如地平面附近），折射角可相差半度。除了和光波的频率有关外，折射率还和大气压、温度、水蒸气压力等因素有关，在天文观测时都要进行校正。

三、大气中的主要光学现象

在太阳光和月光等白然光的照射下，由于大气中气体分子、气溶胶和云雾等降水粒子的

反射、折射、散射，可在大气层中产生曙暮光、朝晚霞、虹、晕、海市蜃楼等一系列光学现象，这些现象往往是大气现象的反映或某种特殊天气的前兆（如"月晕而风"），因此可作为天气和气象预测的依据。

1. 曙暮光

当太阳位于地平线以下时，地面上已经看不到直射光，但由于大气层中气体分子对太阳光的散射，天空还有一定的亮度，地面也有一定的照度。这种现象在日出前称为曙光，在日落后即为暮光。

日落后，随太阳与地平线的夹角越来越大，能受到太阳照射的大气层的位置越来越高，同时由于高空大气越来越稀薄（大气分子数目随高度增加按指数规律衰减），使天空散射光的强度越来越弱，天空的亮度越来越暗，地面的照度渐小。反之，在日出前，由于太阳与地平线的交角越来越小，受到阳光照射的大气层的高度逐渐向空气分子密度增加的低层大气移动，散射光越来越强，天空亮度越来越亮，地面照度越来越大。按曙光开始和暮光终了的时间（或太阳与地平线的夹角）不同，又有民用曙暮光、航海曙暮光、天文曙暮光之分。

民用曙暮光。当大气散射使地面照度减弱到难以辨认印刷品的特大号字体（或不用人工照明就难以进行户外活动）时，就是民用曙光的开始和暮光的终了。在晴天时，相当于太阳在地平线以下6°～8°。

航海曙暮光。航海者利用海岸目标作为海上定位的参照物时，可在天空亮度比民用曙暮光暗时观察到目标物，这相当于太阳在地平线以下12°时，这就是航海曙光的开始和暮光的终了。

天文曙暮光。当太阳在地平线以下18°时，大气分子对阳光的散射已经相当微弱，可以看到天空的所有肉眼能见的恒星（亮度在6等以上的星），这就是天文暮光的开始和曙光的终了。

曙暮光的持续时间在赤道附近最短，随纬度增加而变长。曙暮光现象与高层大气的密度、气溶胶粒子的多少及分布等影响高层大气光学性质的因素有关，根据曙暮光现象的特征可以间接的推测高层大气的状况。

2. 朝晚霞

日出前和日落后，在太阳附近的天空出现色彩绚丽的光线，从太阳升起或下落的位置向天空呈现扇形的彩带光环，在日出前称为朝霞，在日落后为晚霞。当太阳离地平线远时，颜色较浅，随接近地平线，颜色加深，扇形亦随之缩小。每当民用曙光初现，朝霞开始映射，当民用暮光终止，晚霞消失。大气中的水蒸气和尘埃越多，朝晚霞越明显，而且红色越丰富。

3. 霾

霾是浓度大、直径小的气溶胶粒子对太阳光散射出现的现象，出现霾时，大气浑浊，水平能见度在10km以下（6级以下）。透过霾层远望时，好像有一层薄幕使物体被染色，以天空为背景时，霾层呈淡黄色或橙色，以暗色物体为背景时，霾层呈浅蓝色。

4. 虹

虹是太阳射入雨滴、雾滴，经折射进入雨幕或雾幕，再经反射形成的彩色光环。虹对观察者的角半径是42°（以观察者站立位置为顶点，以地平线为一边，张开角为42°处），色序排列是内紫外红，总宽度约2°，这是主虹。有时，在主虹外面，角半径52°处，出现与主虹同心的副虹（又叫霓），副虹的色序与主虹相反，是外紫内红，宽度约是虹的两倍，但明亮

程度不如虹。

通常雨滴越大，虹越鲜艳明亮。当雨滴平均直径为1～2mm时，紫色和绿色光环特别明亮，红色光环明显；当雨滴平均直径为0.5mm时红色光环的亮度减弱；雨滴平均直径为0.2～0.3mm时，不出现红色光环；雨滴平均直径为0.08～0.1mm时，仅有紫色光环明亮；雨滴的平均直径小于0.06mm时，仅出现淡白色的光环，称为白虹，以此为依据，可根据虹的颜色，大致估计雨滴的大小。但天空的雨滴大小不可能均匀，因此，虹的色彩、亮度会随之变化。

5. 晕、华和宝光环

晕、华和宝光环都是大气中水气、雾滴、冰晶等对日光或月光折射、衍射、反射后形成的大气光象。

晕是大气中的冰晶（卷云、冰雾）对日光或月光折射和反射形成的环状或弧状光环，最常见的是对地面观察者张22°角的22度晕。这种晕色序为内红外紫，与虹的色序相反。

华是在天空有薄云时，透过云层在太阳或月亮周围看到的彩色光环，其色序为内紫外红，但内层较明显的是青白色或白色，中间是黄色，外缘呈红褐色，最多可出现三重，最靠近发光体（太阳或月亮）的光环即所谓“华盖”。由于太阳光太亮，日华不容易观察到，多见的是月华。晕和华还是一种天气变化的征兆：天空中日晕明显时，说明大气中气溶胶或大尺寸粒子运动强烈，是起风的征象；当天空中的月晕变成月华，而且华的张角又变小时，说明天空中云层变厚，水滴变大，是降雨的前兆（“日晕而风，月晕而雨”）。

宝光环是人在背向太阳时由小水滴组成的云、雾背景上可看到自己影子周围出现的彩色光环，其色序与华相同，为内紫外红，这种彩色光环可达5重之多。在四川的峨眉山主峰金顶，游客经常看到这种宝光环，并称为“佛光”。在德国则是在哈茨山脉的布罗肯峰观察到，因此命名为“布罗肯宝光”（Brocken spectrum 或 Brocken bow）。

6. 星光闪烁

星光通过大气层后，亮度、颜色甚至位置都发生随机变化，这是光波在大气湍流中传播的效应。在晴空夜晚，肉眼就能看见星光亮度的闪烁（俗语称为“星星眨眼”）。除了亮度和颜色的变化，其位置也有几分之一秒（角）到几秒（角）的变化，其变化频率为2～30Hz。星星亮度的闪烁是由于恒星发出的光经过大气层湍流时亮度的变化，而星星位置的抖动是光波到达观测者处的相位移动所致。恒星的高度角（在天空中对地平线所张角度）越小，光波行走的路程越长，星光的闪烁越明显。

四、海洋水体的光学性质

1. 海水固有的光学性质

光在海水中传播一定距离后会由于海水对光的散射和吸收而减弱。在均匀的水体中，辐射通量为F的单色光在经dr后，辐射通量的衰减为：

$$dF = -\mu F dr$$

式中　μ——海水的线性衰减系数，其数值随光的波长变化。

在清澈的大洋海水中、波长中值约为480nm的青色光（为蓝—绿色光波段）的线性衰减系数最小，（μ=0.05/m）；在近岸的海水中由于有较多的悬浮物和泥沙，线性衰减最小的波段变为波长约530nm的绿色和黄色波段。

海水的线性衰减系数包括吸收和散射引起的衰减两部分，即：$\mu = a + b$，其中a是海水的吸收系数；b是海水的散射系数。上述海水的线性衰减系数随光的波长变化的主要原因

是海水中悬浮颗粒对光的选择性吸收所致。

光在海水中的散射包括海水分子引起的瑞利散射、海水中尺寸大于光波波长的悬浮颗粒引起的米散射和水中透明物质折射等引起的光偏离直线方向的随机过程。在这些过程中，悬浮颗粒引起的散射（米散射）比海水分子的瑞利散射大得多，而且这种散射与光波波长的关系并不明显。

光波在海水中由于吸收将光能转变为热能和海洋生物通过光合作用吸收太阳光的光能，变成化学能，是地球生态环境和动植物生命过程中的重要环节。在清澈的海水中，蓝色光的吸收系数和散射系数大致相等。而对其他颜色的波段，海水对光的衰减，绝大部分是吸收所引起。在海水浑浊、悬浮颗粒多的海水中，光的衰减则主要是由于散射（与频率关系不大的米散射）引起。

衡量海水对光衰减的常用和传统的参数是海水的透明度（记为 Z_m），海水的透明度是在船舷背阴的一侧，用直径 30cm 的白色圆盘垂直地投入水中，能看到该白色圆盘的最大深度，即为海水的透明度 Z_m。透明度是表征在海水中，沿垂直深度增加的光的散射和吸收量的变化，在许多海域，海水透明度 Z_m 和线性衰减系数 μ 的经验关系为：

$$\mu = (2.7 \sim 3.5)/Z_m$$

水中能见度是从大气光学借来的术语，由于光在水中的吸收和衰减比在空气中强烈得多，水中的能见度比大气中的能见度要低得多，海水中的水平视程仅是通常大气层中视程的千分之一左右。水中能见度取决于目标与背景的视亮度的对比值，随观测距离增加，目标物与背景视亮度的差别减小，能见度的减小比在大气中明显得多。

2. *海洋的表观光学性质*

太阳光或天空的散射光通过海面进入海中，会形成与海水性质有关的辐射场分布。其中最常用的参数是辐亮度（记为 L）和辐照度（记为 E）。

辐亮度是单位立体角和单位面积发出的辐射光通量。辐亮度随海水深度增加而变化，大致规律是随深度增加，辐亮度按指数规律减小。辐射到海面上的太阳辐射约有 50％是红外辐射，其中大部分在水深 1m 以内的海水表层吸收。在水下测得的太阳光光谱的峰值是在海水对太阳光衰减最小的蓝—绿色波段，虽然这一波段的入射功率还不到太阳总入射功率的 1/10，但却是海水下光谱的主要成分，以致在水深 600m 处，还能用光电方法测到。

辐照度是单位面积上的辐射通量，以海平面为基准，分为向上的辐照度和向下的辐照度。向下的辐照度与太阳的高度、光的波长和海水深度有关，与在水下接收到的光谱有关。海洋的表层海水中，向下的辐照度最大的是波长为 480～500nm 的（青绿色）波段，随水深增加，向下的辐照度的波长移向波长 465nm（清蓝色）处，而且辐照度也随深度增加按指数规律减小。

第三节　人的视觉与光环境问题

除了讨论光源问题（天然光源及人工光源）和主要的地球介质（大气及海水）的光学性质以外，环境光学更关注人的视觉以及光环境问题。这些问题涉及人的视觉和光的关系，光和光环境对人生理和心理的影响，合理的采光等问题。

一、光和视觉

在人的各种感觉器官和知觉中，眼睛和视觉无疑是最重要的：人从外部获得的信息的相

当大部分（2/3～3/4）是通过视觉获得的。另外视觉获得的信息或知觉是全部视觉环境空间所提供的信息，而人的某些知觉，例如触觉则只是感知局部物体的某些方面（大小、表面光滑或粗糙、几何形态等），而视觉则能提供上述各方面的信息以及该物体背景环境的信息。

1. 视觉形成的四个阶段

人的视觉形成包括以下四个阶段：

光源。太阳或人工光源发出光辐射，这是原始的光源。

二次光源。太阳光和人工光源产生的光经过大气层、水、镜片等会改变光谱，经过改变的光照耀在自然的物体和人工的物体上，会产生亮度、色彩、形体的差异，成为二次光源。

眼睛。二次光源发出的不同颜色、亮度的光信号进入人眼的角膜、虹膜、水晶体、到达视网膜刺激视网膜上的锥状细胞和杆状细胞，在视网膜上成像。视网膜上的杆状细胞对弱光非常敏感，其亮度阈为 $10^{-8}cdl/m^2$ 至 $0.03cdl/m^2$，在这样的光信号条件下，主要是视网膜上的杆状细胞起作用，称为暗视觉。在光信号亮度超过 $3cdl/m^2$ 时，主要是视网膜上的锥状细胞起作用，称为明视觉，锥状细胞主要起辨色作用，根据锥状细胞的吸收光谱，可分为蓝色锥状细胞、绿色锥状细胞、黄色锥状细胞等三种，能分辨蓝、绿、黄三种原色。在光信号的亮度为 $0.03～3cdl/m^2$ 时，属于明视觉和暗视觉的中间状态，称为中间视觉。

大脑。在视网膜上产生的图像经过视神经传递，到达大脑，经大脑分析、判断、联想成为知觉。

在整个视觉形成的过程中，不仅有“看”的视觉器官的活动，而且有“解释、理解”的大脑思维活动，因此人的视觉即有视觉生理方面的因素（如光信号的亮度，人眼的亮度阈等），也有心理方面的因素（如背景光线的强弱、色彩会影响人眼对目标物的识判，影响人的注意力的集中）。

2. 视觉的生理和心理问题简述

如前所述，人眼在可见光信号的亮度为 $10^{-8}～0.03cdl/m^2$、$0.03～3cdl/m^2$ 和 $3cdl/m^2$ 以上产生暗视觉、中间视觉和明视觉。但在亮度超过 $10^6cdl/m^2$ 时，会由于光信号的亮度过强，损伤视网膜。在可见光范围以外，紫外线和红外线都会损伤人的眼睛，会灼伤人眼的角膜、虹膜、视网膜。

在亮度阈以上，人产生视觉，但人的视觉是随亮度增加的，即在明亮和黑暗条件下，人眼对同一目标物的视觉效果是不同的。通常随亮度增加，视觉效果变好，在亮度为 $3000cdl/m^2$ 以内都是如此。在亮度超过 $3000cdl/m^2$ 时，人眼的视觉效果（视力）不仅不再增加，反而会由于光信号使视觉疲劳而视力下降。

人眼对目标物的识判主要是取决于目标物和背景亮度的对比值，在目标物与背景的亮度对比值大于对比感阈 ε 时，才能识别目标物。印刷品多是黑字印在白纸上，是因为在同样照度条件下，黑色的反射系数小，其亮度小，而白色反射系数大，其亮度大，即黑字、白纸有明显的亮度差异（反差），容易识别。在亮度不同时视觉的对比感阈是不同的。通常在夜晚，人眼对目标物和背景的亮度和颜色的识别都比白昼迟钝。只有在亮度合适时，人眼的亮度对比感阈最小，对目标物的识别最清楚。

由于感光细胞在视网膜上的分别特征和眼眉、面颊的限制，人眼的视看范围（即视场）是有限度的，人的双眼不动时，其视野范围是：水平面 180°，垂直面 130°（其中向上 60°，向下 70°），从中心视场向外 30°是视觉清楚的区域（近背景视场）。

人从事与视觉有关系的活动的效率与视觉刺激有关，即活动或作业的效率与有关的目标

物的尺寸、目标物与背景的对比、背景的反射特征和对背景的观察时间等四个独立的因素有关。此外，人眼总是首先被吸引到整个视场中亮度最大、颜色最鲜艳或亮度及颜色反差最大的部分，这就是视觉的向光性。因此要提高活动或作业的效率，从视觉环境而论，就是要使人的注意力集中在活动或工作的目标上，例如，教室和阅览室的视觉环境应该不光怪陆离，以免影响学生和读者注意力的集中。另外，对活动或作业的目标物应该有合适的照度。根据对视觉识别速度和准确程度都有很高要求的作业（例如，用机床加工零件）的效率与照明条件关系的研究表明，当作业面的照度从 5lm/m² 增加到 500lm/m² 时，作业的差错率明显减少；如果照度再增加到 1600lm/m²，作业差错率的减少并不明显。

除了目标物的照度以外，还应与背景有适当的亮度对比（反差），如果将背景的照度都处理成黑色（背景照度 $L_b=0$），使目标物与背景的对比值过大，其视觉效果并不一定好。此外，目标物和背景的颜色对人的视觉刺激也是有差别的，长期在背景为红色的环境中，视觉容易疲劳，容易有“热”的感觉，但红色容易引起人的警视。长期在颜色单调的环境中，人容易“昏昏欲睡”，长期在亮度和颜色变化强烈的环境中，人容易紧张、兴奋。

还要说明，其他知觉刺激也会影响视觉功能，例如，当噪声声压级达到 90dB 时，人眼对亮度的对比感知阈上升，即对较暗的目标物的识别变得迟钝；在噪声声压级达到 85～110dB 时，40%的人的瞳孔会放大；噪声达到 112～120dB 时，由于眼睫肌的作用使人对运动的目标物的速度判断失准。这些对公路上行驶的机动车司机都非常重要：应该限制机动车鸣笛，以防噪声引起视觉功能的下降。

二、光环境质量及其评价标准

光环境的本质即人的视觉环境，光环境应该能使人在最适宜的视觉生理和心理条件下生活和活动，即应有适当的照度、合适的目标物和背景的亮度对比（反差）、宜人的光色和防止各种对人视觉有害的光污染。人在进行不同的活动时，对光环境的要求是有区别的，如睡眠时要求周围黑暗，而阅读和书写则要求有足够的光照亮度。另外，即使是进行相同的活动，不同的人也可能对光环境的要求有所不同。由于光环境直接影响人的生活质量和工作、活动效率，因此光环境是人类生活最重要的环境领域之一。

1. 照度标准

人眼对外界物体明亮程度差异的知觉取决于外界景物的亮度，由于外界景物的亮度与目标物的光反射系数等许多因素有关，而且这些遗失并非人能调控，因此，实际上还是以照度作为标准。通常以假想的水平工作面的照度作为设计标准：在人站立时，水平工作面距地面 0.9m，人在坐姿时水平工作面距地面 0.75～0.8m，据此规定进行不同的作业和活动时，工作面的照度要求。

由于相当多数的工作面是使用人工照明（电光源），工作面从电光源获得的照度在电光源使用过程中都会由于灯具设备的陈旧和老化、光通量减小而降低。另外，房间内墙壁和灯具表面的污染也会降低照度。因此各国和国际照明委员会（CIF）都不采用在灯具使用开始时，把工作面所获得的照度作为标准，而是使用从开始安装灯具设备到进行维护这样一个照度逐渐减小的过程中的某个中间值作为标准。通常灯具设备的照度有三种数值：初始照度、使用照度、维持照度，三者间关系见图 8－4。

初始照度是灯具设备在使用初期能达到的照度；使用照度是从使用初期到需要维护（或检修更换）灯具设备时的这一段过程中的照度平均值；维持照度是灯具设备需要维护时的照度，通常维持照度不应低于使用照度的 80%。

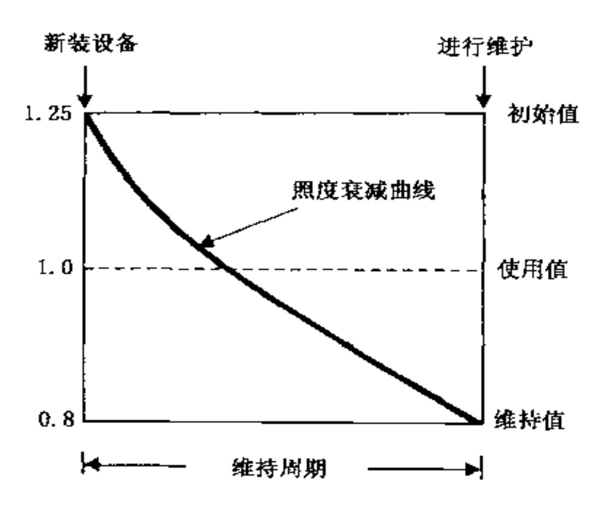


图 8－4　灯具设备的初始照度、使用照度和维持照度

在制定照度标准时还要考虑的问题是，人眼是否能感觉到照度的变化。按韦勃定律：人眼能察觉的照度的变化 ΔE 与照度 E 的比值 $\Delta E/E$ 是一个常数。例如，在照度为 $E_1=10$lx 的房间里，人眼能察觉 $\Delta E_1=1$lx 的照度变化；那么在照度为 $E_2=100$lx 的房间里，照度需要变化 $\Delta E_2=10$lx，人眼才能察觉，即：$\Delta E_1/E_1=\Delta E_2/E_2=0.1$（常数）。正因如此，在制定照度标准时，照度的变化按等比级数（比例系数约 1.5）分级的。例如，国际照明委员会（CIF）建议的照度等级是 20lx—30lx—50lx—75lx—100lx—150lx—200lx—300lx—500lx—750lx—1000lx—1500lx—2000lx—3000lx—5000lx 等。表 8－5 是国际照明委员会（CIF）推荐的不同作业、活动时的照度标准。

表 8－5　国际照明委员会（CIF）推荐的不同作业和活动的照度标准

作业或活动	推荐照度，lx
室外入口区域	20—30—50
交通区，简单判断方位、短暂停留	50—75—100
工业生产监视、储藏室、衣帽间、门厅等非理性工作房间	100—150—200
有简单视觉要求的作业：粗加工、讲堂	200—300—500
有中等视觉要求的作业：办公室、机加工、控制室	300—500—750
有较高视觉要求的作业：绘图室、试验和检验、缝纫	500—750—1000
难度很高的作业：精密加工和装配、颜色辨别	750—1000—1500
有特殊视觉要求的作业：手工雕刻、精细工件检验	1000—1500—2000
极精细的作业：微电子装配、外科手术	>2000

上述标准给出的是范围值，一般情况下采用中间值即可，在以下一些特殊的情况下，可采用较高值：纠正工作差错；作业面上工件和背景的反差小；作业对视觉准确的要求非常严格（如显微外科手术）；工作人员的视力较差。

我国在 1979 年制定了《工业企业照明设计标准》（TJ34—79），其中规定了在各种不同的工作环境中的照度等级标准以及工业企业辅助建筑的最低照度标准。

表 8－6　工业企业辅助建筑的最低照度标准

序号	房间名称	最低照度，lx	规定照度的平面
1	设计室	100	距地 0.8m 的水平面
2	阅览室	75	距地 0.8m 的水平面
3	办公室、会议室、资料室	50	距地 0.8m 的水平面
4	医务室	50	

续表

序号	房间名称	最低照度，lx	规定照度的平面
5	幼儿园、托儿所	30	
6	食堂	30	
7	车间休息室、单身宿舍	30	
8	浴室、更衣室、厕所	10	
9	通道、楼梯	5	

除了最低照度的要求外，还应考虑照度的均匀程度，通常要求工作面上的最低照度与平均照度的比值不低于0.7（CIF建议不低于0.8）；此外CIF还建议在工作房间内，用于人员走动的区域（交通区域）的平均照度不应低于工作区平均照度的1/3；相邻房间的平均照度不应相差5倍。

在大多数公共建筑物中，在居室中，在各种工作室休息区、交通区，照明的效果往往是用能否看清人的容貌，容貌是否清晰、自然作为照明效果的标准，根据这种要求，适当的垂直方向的照明往往比水平方向的照明更重要。

2．对目标物与背景亮度对比值的要求

人在进行作业或活动时，除了工作面上的工作对象、物体进入视野外，在工作区附近的其他物体或对象，如墙壁、顶棚、窗户、灯具都会进入人的视野，对人的视觉、工作效率都产生影响。这里有几方面的因素应予考虑：视场中心目标物和周围视野的亮度对比应该合适，如果视场中心的目标物与周围背景物的亮度相差过大，会加重眼睛瞬时适应在不同照度下获得视觉图像的负担。另外，如果房间内照度过于均匀，则不易凸现房间的立体感。因此不论是从看清图像的角度，还是从视觉舒适的角度都应该考虑房间内亮度的合理分布。

在工作房间内，邻近作业面的区域的亮度应该比作业面的亮度低，但不得低于作业面亮度的1/3；而作业面周围的背景区（墙壁、天花板等）的平均亮度应该不低于作业面平均亮度的1/10；灯具和白天的窗户的亮度也应该在作业面亮度的40倍以内。

为使房间内照度的合理分配，应该综合考虑照度和房间内各部分对光的反射系数这两方面的因素（因为亮度和照度与反射系数的乘积成正比）。例如，墙壁的反射系数应该在0.5～0.7之间，使其照度达到作业面照度的1/2，这样墙壁的亮度可以达到工作面亮度的1/4～1/3。

装修水平高的建筑物大厅的亮度分布应该能凸显空间和结构的形象，或某种室内的装饰效果。在美术馆、展览馆一类建筑内，则应能突出展览品的艺术效果，其次才是考虑观众的视觉舒适。

3．光色和显色性

光色是指光的颜色给人的直观感受，从光源来说，需要考虑色温和显色性问题。如前所述，色温是衡量光源性能的指标之一，色温较低的暖色光（米黄色、橙色）使人有安静舒适的感觉，而色温较高的冷色光则使人振奋。根据光源发出的光的光色，可将光源按光色分为三类（色表）：Ⅰ类：暖色，色温在3300K以下；Ⅱ类：中间色，色温3300～5300K；Ⅲ类：冷色，色温在5300K以上。应该根据房间的用途或功能选择光源的光色。

除了光色以外，还要考虑光源的显色性，即光源能较清晰地显示目标物尽可能丰富的反射光光谱特征。国际上通行的标准是国际照明委员会（CIF）选定的8种颜色，考察光源对

这 8 种颜色的显示效果，以对这 8 种颜色显示所评分的平均值，作为光源的显色指数（记为 R_a），并按显色指数将光源分为 5 类。

表 8－7　光源的显色分类

显色类别	显色指数范围（R_a）	色表	优先应用范围	允许应用范围
Ⅰa	$R_a>90$	暖 中间 冷	颜色识别 临床检验 美术馆	
Ⅰb	$80<R_a<90$	暖 中间 冷	家庭、旅馆 餐馆、商店、办公室、学校、 医院、印刷、油漆、纺织行业	
Ⅱ	$60<R_a<80$	暖 中间 冷	工业建筑	办公室 学校
Ⅲ	$40<R_a<60$		显色要求低的工业	工业建筑
Ⅳ	$20R_a<40$			显色要求低的工业

功能不同的房间或建筑物，对显色的要求是不同的，如印染、彩色制版、绘画陈列等要求精确的颜色分辨，医生查看病人的气色，顾客选购珠宝首饰也要有良好的显色。而建筑工地则要求较高的照度，而对显色的要求并不突出。目前采用的电光源中，显色性能好的灯（如白炽灯），其发光效率低（仅 10%左右），寿命不长（2000h 以内）。而发光效率高、寿命长的灯（如高压钠灯），其显色指数又很低。为了兼顾照度和显色性这两方面的要求，可以使用两种性能有差异的灯共同照明，这就是"混光照明"：用发光效率高的灯，提高视觉空间的亮度；同时用色温合适、显色指数高的灯改善显色性能。

第四节　光污染及其防治

光污染包括红外线污染、紫外线污染及最常见的可见光污染（包括激光污染），另外城市中出现的视觉环境中的人所厌烦的光线和图像还会产生视觉污染。

一、红外线和紫外线污染

20 世纪后期以来，红外线在军事技术、人造卫星技术、遥感观测等方面获得广泛应用，20 世纪末更迅速地在民用领域获得应用（如电视机的遥控器），已经深入家庭，因此红外线污染问题亦随之产生。红外线是一种热辐射，能灼伤皮肤。红外线对眼睛的伤害有几种情况：波长为 750～1300nm 的红外线可透过眼角膜，造成对视网膜的伤害，尤其是波长为 1100nm 的红外线，可通过眼角膜、晶体直接烧伤视网膜；波长在 1300nm 以下的红外线能对虹膜造成伤害；波长大于 1400nm 的红外线绝大部分被角膜和眼内液体吸收；波长 1900nm 以上的红外线，几乎全部被角膜吸收，造成角膜浑浊或白斑。

紫外线最早是用于医院消毒，后来发展到家用，另外在工业和宇航探测方面也广泛应用紫外线。波长为 100～300nm 的真空紫外部分，可被空气和水吸收；波长为 190～300nm 的远紫外部分，大部分可被生物吸收；波长为 300～330nm 的近紫外部分则可被某些生物分子

吸收。在高原地区由于空气稀薄，对紫外线的吸收变弱，因而紫外线辐射比平原地区强烈；在雪地上，白雪对太阳光的反射也会使反射光的光谱向高频、短波长段偏移，使紫外线增加。紫外线主要伤害人的眼睛和皮肤，波长250～305nm的紫外线会烧伤角膜，波长为288nm的紫外线对眼角膜的伤害最强烈（例如，电焊弧光中的紫外线成分），其作用是产生一种使人极疼痛的角膜白斑，还导致流泪、眼睑痉挛、眼结膜充血、睫状肌抽搐（畏光眼炎或电光性眼炎）。紫外线对皮肤的伤害主要是灼伤引起的红斑和下水泡。人体的胸、腹、背部对紫外线最敏感，波长为250～260nm和280～320nm的紫外线对皮肤的作用最强。

二、可见光污染

可见光污染中危害最大的是核爆炸时产生的极强的闪光，可使在距爆心几千米以内的人眼失明。长期在强光条件下工作的工人（如冶炼工、玻璃工、电焊工）也会由于长期强光刺激，使眼睛的视觉功能降低。灯光污染还严重的影响天文观测，天文望远镜对光线有极高的灵敏度，甚至可观测距地球1000亿光年处星球的光域，但在距天文台30km处的霓虹灯发出的光线就足以形成对观测遥远天体发出的光线强烈的背景干扰，使天文望远镜的性能大为降低，甚至使天文观测无法进行。

现代，激光的应用已经相当普遍，在医学、物理、化学、测绘、机械加工等领域中激光的使用还在扩大，因此也带来激光污染问题。激光的光谱大部分属于可见光范围，激光的方向性好，能量集中，颜色单纯，但若通过人眼的晶体，则会由于晶体的聚焦作用，使到达眼底的激光的强度增加几百倍甚至更多，因而会烧伤眼底。激光光谱的一部分属于紫外和红外部分，也会伤害眼睛，大功率的激光还会伤害人体的深层组织，还会影响神经系统。德国科学家曾经对11家舞厅的激光设备进行调查，认为舞厅中的激光是一种光污染：若激光光束透过眼睛内的晶体到达眼底，其焦点处温度可能达到70℃，足以伤害眼睛，而且可能引起中枢神经系统方面的疾病。

在大气层中由于空气污染或气象条件改变，致使自然光照度减弱，天空亮度降低，能见度降低，以致对航空和地面及海上交通、测绘等部门的作业无法进行，这些也是另外一种意义上的光污染。

可见光污染中最常见的是眩光，例如，夜晚公路上行驶的汽车开启的照明用的大灯，对对面驶来的汽车，就是一种眩光；再例如，建筑物的大玻璃墙幕，在太阳直射光照射下的反射光，对过往的行人和对面的建筑物也产生眩光。国际照明委员会对眩光所作的定义如下：眩光是一种视觉条件，这种条件是由于亮度分配不适当，或亮度变化幅度过大，或亮度在空间、时间上的存在极端的对比（反差），以致引起不舒适或降低重要目标物的能力，或同时引起不舒适和观察重要目标物能力的降低。

从以上眩光的定义可见：眩光是对视觉有影响的现象；眩光的产生是由于亮度的时间、空间分布的强烈变化；眩光能产生观察者在视觉生理和心理上的暂时失衡。

按眩光产生的原因和过程，眩光可分为以下几类：

直接眩光。观看目标物的方向或接近这一方向上有较强发光体时，由发光体引起的眩光。例如，天空的飞行器在飞近太阳在天空的位置时，会因太阳眩光看不清飞行器，此时，太阳的眩光就是直接眩光。另外，建筑物的大玻璃墙幕由于反射太阳光，变成强光源，此时若观看玻璃墙幕附近的广告标牌，就会受到玻璃墙幕直接眩光的影响。

间接眩光和反射眩光。在观看目标物方向上没有发光体，但在视野中，在距离目标物较远处，存在发光体，由该发光体发出的光线或经反射的光线可能会使被观看的目标物的亮度

过大，这样产生的眩光就是间接眩光或反射眩光。在上例中，高层建筑物上的玻璃墙幕的反光可能使在地面附近的路标、站牌过亮而看不清。

光幕眩光。当被观看的目标物由于附近照明条件不当，使目标物与背景的亮度对比值变小，相当于在目标物上产生一层光幕。例如，在观看电视或电影时，室内的照明过亮或在露天观看，都会由于屏幕或银幕的亮度对比值降低而使观看效果变差，这是由于过亮的照明在目标物上产生了光幕。

按眩光对视觉的影响，可分为以下几类：

失能眩光。若眩光使人的视觉效果降低，这种效果称为失能眩光。此时，外界的眩光进入人眼，分散在视网膜上，使人需要经过一番调整和适应，才能看清目标物。国外也将此类眩光称为减视眩光。与年轻人相比，老年人对失能眩光的感受要强烈得多，这是由于老年人眼睛内的晶体减少，眼底血管老化变细，在外界亮度条件变化时，调整功能变差所致。

失明眩光。在极强烈的眩光作用下，视觉功能的损失严重，眼睛暂时失明，这就是失明眩光或盲目眩光。此时眼睛受到眩光的损害是生理性的。

不舒适眩光。若眩光仅是使眼睛感到不舒适，虽然并没有影响到视觉（即未在生理上损害视觉器官），但在心理上产生不舒适感，因此这种眩光也叫心理眩光。

对眩光的评价涉及到眩光光源和观察者的位置等方面的因素，也有各种评价方法。总体来说，是与眩光光源的面积及眩光光源亮度的平方成正比；与眩光源到观察者距离的平方、仰角（视线与眩光光线的夹角）的平方成反比；与背景物亮度的0.6次方成反比。但眩光造成的不舒适感是因人的性别、年龄、职业等多方面的因素所决定的，而即使是性别、年龄、职业都相同的人群，对眩光的适应能力也会因人的精神状态、健康状况不同而有差异。在一些公共场所，例如体育比赛的场馆，要求尽可能的减少眩光，以免影响运动员的比赛和活动，例如，足球场的照明光源安放在较高处，就是为了减少眩光。

近年来，国内一些城市高层建筑物使用玻璃墙幕的势头不减，有统计认为，我国已经累计有1500万m^2的用各种玻璃材料制作的建筑物墙幕，每年还以500万m^2的速率增加，这些墙幕明晃耀眼，但其对太阳光的反射系数高达0.82～0.9，不仅比白色墙面（反射系数为0.69～0.8）大，而且是砖面、毛面墙幕的反射系数的10倍以上，是大城市重要的光污染源。

在城市中经常存在杂乱的视觉环境，如街道两侧杂乱的电线、电话线，零乱堆放的垃圾，排列无序的货滩，五颜六色的广告招贴，不论其张贴位置和内容，都使人产生不舒适感的视觉污染。但对此类问题的处理和对待，还停留在市容整顿等层次上，远未将其列入环境和可持续发展的障碍问题。

三、光环境的治理和光污染的防治

光环境的治理主要靠城市的规划、管理和建筑物的设计来解决。既要充分利用自然光资源，使公用和民用建筑有良好、合理的采光，特别是使学校的教室、阅览室，工厂的车间和设计室，高校和科研单位的实验室有足够的照明。在此还要指出，我国一些城市的高层住宅多沿交通干道布列，有了所谓景观，但对后面的建筑物的布局、采光带来困难。应该说这方面的教训是很多的。城市，尤其是大城市的建筑物应该限制玻璃墙幕等容易产生眩光污染的建筑材料的使用，还要保证对光环境有特殊要求的建筑物（天文台、光学实验室）有适宜的光环境，例如天文台应远离市区，并对今后城市发展做出预计。避免城市发展过快使天文台在建成后不久就因光污染而性能降低或不能使用。

还要指出，太阳光是一种资源，而且是取之不尽，用之不竭的资源，是地球上生态环境的重要组成部分，但对太阳光的资源属性、认识和开发程度都是不够的，或者，仅是看重其能源属性，而忽略其在生物生长，在采光方面的潜在价值。在中国的西部开发，在中国北方的农村和乡镇开发中都应该考虑充分利用太阳光资源。还要指出，和任何自然资源一样，开发使用不当和过度，也会产生污染，在城市和区域的开发、设计、规划中必须考虑这些因素。使阳光和太阳能资源能得到合理、充分的开发，一方面合理地开发利用光资源，另一方面则要最大限度地避免污染，这是城市和地区开发规划设计的重要课题。

光污染的防治是城市建设的发展提出的环境问题，除了对有红外线和紫外线设备的场所采用必要的防护设备和措施外，还要采用各种新材料和技术手段减少可见光污染。例如，城市大型建筑的玻璃墙幕可用镀膜玻璃，以减少其对可见光的反射；再例如，汽车的玻璃窗用低辐射的防晒膜，可防止红外线和紫外线的透过，还可阻隔约 78% 的眩光，仅允许可见光透过。在高速公路附近还可安置防止眩光的板状栅栏（最好这种栅栏还同时有阻隔噪声的作用），以防止迎面过来的汽车的车灯发出的强光对汽车驾驶的影响。个人还可以采用各种防护眼镜（尤其是电焊工、炉前工和长期在野外露天作业的工种）防止强光和眩光对人眼睛的刺激和伤害。

防止光污染的问题和人工照明问题有一定联系，应该尽量采用发光效率高、光色好的电光源，这可节约能源，提高照明效果。目前还比较广泛使用的白炽灯一类的热辐射源的发光效率低、寿命短，应该逐渐限制使用，推广使用细管荧光灯等节能光源。

小　　结

介绍了光辐射的定义、光度学物理量（如发光强度、光通量、照度、亮度、发光率等）、太阳的基本知识（如太阳的直径、体积、质量、物质成分）。太阳的结构分为核反应区、辐射区、对流区、太阳大气层。太阳大气层中太阳黑子、光斑和谱斑、耀斑、日珥出现活动的区域称为太阳活动区，太阳活动的原因是太阳大气层下面对流层的运动，太阳活动对地球的气候和生态环境会产生影响。

太阳对地球作用主要表现在三个方面：太阳的能量以电磁波（包括可见光）和微粒辐射的形式向外发射，这些辐射达到地球时，会对地球的磁层、电离层中低层大气产生影响；在地球轨道附近，太阳对地球的电磁辐射对地球表面和地球大气层加热，产生大气层的温度垂直分布和大气环流，尤其是对流层中的各种天气现象。太阳辐射中波长短于 140nm 的紫外线，是地球大气层中电离层和臭氧层的主要电离源。太阳的微粒辐射产生的太阳风则对地球的磁场发生作用。

大气中的主要光学现象有朝晚霞、虹、晕、海市蜃楼等。这些现象往往是大气现象的反映或某种特殊天气的前兆（如“月晕而风”），可作为天气和气象预测的依据。

除了讨论光源问题（天然光源及人工光源）和主要的地球介质（大气及海水）的光学性质以外，环境光学更关注人的视觉以及光环境问题。这些问题涉及人的视觉和光的关系，光和光环境对人生理和心理的影响，合理的采光等问题。

光会产生光污染，光污染包括红外线污染、紫外线污染及最常见的可见光污染（包括激光污染），城市中出现的视觉环境中的人所厌烦的光线和图像也会产生视觉污染。

城市光污染和光环境的治理主要靠城市的规划、管理和建筑物的设计来解决。既要充分

利用自然光资源，使公用和民用建筑有良好、合理的采光。防止光污染的问题和人工照明问题有一定联系，应该尽量采用发光效率高、光色好的电光源。对有红外线和紫外线设备的场所采用必要的防护设备和措施，采用各种新材料和技术手段减少可见光污染。

思考题

（1）如何认识太阳辐射的资源属性？

（2）说明你对建立良好光环境、保护视觉，防止光污染的理解。

第九章　环境地球物理中的热学问题

热学中的基本物理参数是：温度、热量、热容、比热、熵和比熵等。

温度。温度是热学中最基本和最重要的概念，温度是衡量物体或系统热量或冷热程度的物理量。温度概念的建立是以热平衡为基础的：一切互为热平衡的系统的温度都是相同的。现用的摄氏温标是用水银作为测温物质，以水银在不同温度下的长度变化作为测温属性，以纯水在标准状态下的冰点和沸点，作为固定参考点，并将其规定为0℃和100℃，将在这两个参考点间的温度或水银长度的变化分成100等份，每份规定为摄氏1℃。英文字母C的意义原来是"百分度"（Centigrade），到1948年，第九届国际计量会议上才重新解释为Celsius，以纪念水银温度计的发明者，瑞典的物理学家摄尔修斯（Celsius，1742）。从热力学的研究可知，宇宙中存在一个最低温度，这就是热力学温标中的绝对零度。热力学温度单位（K）是水的三相点温度的1/273.16，记为K（开尔文）。由此，水的三相点（冰、水、水蒸气可共存的点），即+0.01℃为热力学温度的273.16K。按热力学温度衡量，宇宙空间由于背景微波辐射的热力学温度为2.7K；地球气温的最低记录是184.85K；人的正常体温是310.16K（37℃）。

热量。在热学中不以作功的方式传递的能量称为热量，记为 Q，热量的单位是卡（cal），1cal是在标准大气压下将质量为1g的纯水从19.5℃加热到20.5℃所需的容量。国际单位制中用焦耳（J）作为热量单位，1cal=4.1868J。

热容量和熵。热容量是物体温度增加1K时所需的热量，记为 R，单位是J/K（焦耳/开尔文）或cal/1℃。熵是热力学中说明热量传递的重要概念，其定义是：如果温度为 T 的物体（或系统，以下同）吸收（或放出）的热量为 dQ，则该物体的熵 S 的增量为：

$$dS = dQ/T \qquad (9-1)$$

如物体吸热，则 $dS>0$，表示熵增加；如果物体放热，则 $dS<0$ 表示熵减少。从（9-1）式还可看出，当吸收和放出的热量相同时，物体的温度（T）低的，熵的改变大；温度（T）高的，熵的改变小。当温度为 T_1 和 T_2 两物体接触（$T_1>T_2$）时，温度高（T_1）的物体向温度低（T_2）的物体放出 dQ 的热量，此时，高温物体熵的增量为 $-dQ/T_1$，低温物体熵的增量为 $+dQ/T_2$，由于 $T_1>T_2$，所以：

$|dQ/T_1| < |dQ/T_2|$，因此有：

$$dS = -dQ/T_1 + dQ/T_2 > 0$$

热力学的基本定律认为，任何一个熵的增量 $dS>0$ 的过程，都是不可逆的，即热量不会从低温物体传递到高温物体。还要说明的是，熵和热量、能量等守衡量不同，是个不守衡量。

比热和比熵。比热是单位质量物质的温度升高1K（或1℃）时所需的热量，比热是热容量和物体质量的比值，记为 $C=dR/dm$。比熵是在热传递过程中，单位质量物体中熵的改变量，即比熵是熵与物体质量的比值。

热流和热导率。热流是单位时间通过的热量，热流可记为 Φ，有 $\Phi=dQ/t$，单位为W（瓦特），1W=1J/s。热导率（记为 κ）是表征介质传递热量能力的物理量，面积为 F 的介

质的在厚度为 d 的两界面上的温度为 $T_1>T_2$ 时，在单位面积上，单位时间传递的容量（即热流 Φ）与温度差 T_1-T_2 成正比，与介质厚度 d 成反比，有：

$$\Phi/F=\kappa\cdot(T_1-T_2)/d \qquad (9-2)$$

式（9-2）中的比例系数 k 即为热导率，其物理意义是：在一定温度差时，单位面积、单位厚度介质中在单位时间内传递的热量，其国际单位制单位是：W/（m·K）（瓦/（米·开）），原来的厘米·克·秒制单位为：cal/（cm·s·℃）（卡/（厘米·秒·度）），两者间的关系为：

1cal/（cm·s·℃）=418.68W/（m·K）

热膨胀系数。任何物体（尤其是气体和液体）在温度变化时，其体积将会发生变化（冷缩热胀），外界压力保持为标准大气压时，若物体在0℃和 t℃时的体积为 V_o 和 V_t，则其体积压缩系数为：

$$\alpha=(V_t-V_o)/V_o\cdot t$$

第一节　大气层和海水的热学性质及污染物的运动规律

一、大气分层

大气中基本不变的成分是氮、氧、氩，占大气总体积的99.96%，可变成分是含量虽少，但对大气物理状况影响很大的二氧化碳、水蒸气、臭氧，这些成分的多少与大气的热状态有关，大气的分层主要是按热学性质划分的，可分为对流层、平流层、中层、热层、逸出层。

二、大气层中的主要热学过程

1. 非绝热过程

把大气作为整体考虑，其与外界的热量交换过程称为非绝热过程，包括：

辐射。太阳辐射是整个地球最主要的能源，但只有一小部分（约19%）被大气层吸收，大部分（约47%）则被地面（包括海面）吸收，使地面增温。地面增温产生的长波辐射有一部分也被大气层吸收。还有一部分（约34%）太阳辐射则被大气层和地面反射回宇宙空间。通过各种辐射过程大气层可获得能量和失去能量。

热量传输。地面受太阳辐射增温，所获得的热量通过对流、湍流和热传导过程传给大气层（地面热量经辐射进入大气层则如上所述）。其中由于大气层受热不均匀或温度分布不均匀，则会引起对流。水平尺度的对流多在0.1～50km。就天气系统而言，对流在短时间内（如24h）传输的热量要大于热传导和辐射，特别是在热带地区，对流活动会产生水汽凝结和降水等一系列天气变化。

潜热释放。大气层中的水蒸气的凝结、结冰等过程都会有潜热的释放，这也是大气层获得热量的重要方式。

除了上述过程外，在高层大气中由于光化学反应也有能量的释放过程。

2. 绝热过程

大气层中的空气气团在快速上升或下降时，由于来不及和外界发生热交换，可发生膨胀或压缩。在气团上升时，因膨胀而冷却（绝热冷却），其温度下降，气团每上升100m，温度降低0.98℃。反之，若气团下降，则会发生压缩（绝热压缩）而温度上升，而且也是气团每下降100m，温度上升0.98℃。如果气团中所含的水蒸气没有达到饱和状态（气团是干的），其在上升和下降过程中的膨胀和压缩过程称为干绝热过程。若气团是饱和水蒸气的湿气团，则在上升过程中，由于膨胀和降温，水蒸气凝结并放出一部分潜热，弥补在膨胀过程

中消耗的部分能量。在气团下降过程中，由于压缩升温，水蒸气要吸收一部分热能，这种过程称为湿绝热过程。在湿绝热过程中，可能有两种过程：第一，可逆过程，即湿气团在上升膨胀降温过程中水蒸气的凝结物保留在气团中，在其下降过程中则再次吸热而汽化。第二，非可逆过程，在气团上升降温的过程中，因放热水蒸气凝结后变成降水，使气团的质量和成分都发生改变，即过程不再可逆。

三、海水的热学性质

1. 海水的温度

海水表层的水温，主要取决于太阳辐射，因此赤道附近海域表层的海水温度高，可达28～29℃，高纬度及极地海域表层海水的温度低，仅0～1.9℃，地球上海水的温差最大可达30℃。海水温度随深度增加，温度降低，在温带和热带，在1000m深度处水温约4～5℃；2000m深处海水温度约2～3℃，3000m处约1～2℃；在寒带，相同深度处的海水温度比温带和热带低约2～3℃。占地球海洋总体积75%的海水的温度为0～6℃。全球海洋平均温度为3.5℃。

海洋表层海水的温度随季节变化。2月，太平洋中北纬5°～20°及南纬20°～50°海域，海水等温线基本与纬度线平行。8月，太平洋中北纬23.5°～40°，南纬15°～60°海域，等温线也基本与纬度平行。

2. 海水的蒸发和辐射

海水的温度变化对大气温度的变化有明显的影响，是地球上气候变化的重要因素。尤其是海水蒸发，从海水中吸收热量输送进入大气层，不仅影响大气层和海洋的水分交换、热交换，还影响洋流和气候变化。海洋面积占地球表面积的71%，海水的全部质量占地球水圈全部质量的96.5%以上，海水的密度比海面大气的密度高约800倍，全部海水的质量是全部大气质量的258倍，海水的比热约是大气比热的4倍。另外，太阳辐射仅有19%被大气层吸收，其余部分达到地面后主要被海面吸收。因此大气层中的水蒸气，绝大部分来自海水的蒸发。

根据气候学的研究，在赤道海域，由于空气湿度高和海风小，蒸发量最小；在副热带地区海域，有干燥的空气平流，蒸发量最大；在高纬度地区海域，因为空气温度低饱和水气压小，即空气容纳水蒸气的能力有限，因此纬度越高，蒸发量越小。由于温差和湿度差等因素的影响，暖季蒸发量偏低，冷季的蒸发量偏高。全世界海洋年平均蒸发量（折合为海水厚度）约1m，大洋西侧的蒸发量大于东侧；在向极地方向流动的暖流区域，蒸发量明显高于其他海域，墨西哥湾流区蒸发量最大，可达每年3m。我国东海和黄海的年平均蒸发量在1.25m以上，而且从东南向西北呈减小的趋势。

将质量为1g的海水蒸发为同温度的蒸汽所需的热量叫做海水的蒸发潜热，记为L。海水的蒸发潜热和纯水的蒸发潜热相差很小，因此海水的潜热和海水的盐度关系不大，在0～30℃间，海水潜热L与温度T的关系近似为：

$$L = 596 - 0.529T(\mathrm{cal/g})$$

海洋从太阳辐射获得的能量，平均有90%用于海水的蒸发。

根据热力学的概念，任何温度高于绝对零度的物体都向外辐射能量，因此海水还以辐射的形式向大气层辐射能量。海面辐射的光谱几乎与黑体相同，但主要的波段为波长是800～1400nm的红外波段，当海面被污染物（如油膜）覆盖时，红外辐射降低或辐射能量的主要波段向短波波段移动，用红外遥感等手段测得的红外辐射量降低（红外等效温度降低），这

可以成为红外遥感探测海面污染的指标。

四、大气层中污染物的输运与扩散

1. 大气层中污染物及其扩散尺度

大气层中对人类和生物有害的污染物，一部分是由于地球上的地质过程（如火山爆发）及其他物理、化学过程所引起（如森林火灾）。但相当大部分的污染物还是由人类活动所产生，即工业、农业、交通及城市建设产生的各种烟尘、粉尘，各种无机物和有机物（气体或气溶胶）。所产生的污染物在空间和时间上有各种不同的类别：按产生位置有固定源（工厂、电站）和流动源（机动车、飞机）；按排放方式有高空源（烟囱）和地面源（厂房和仓库泄露）；按排放源的几何形态，有点源（烟囱）、线源（交通干道）、面源（区域的排放）；按排放时间有连续源和瞬时源。

污染物在空气中，向下风方向迁移和扩散，其中包括污染物在几百米到几千米的近距离扩散；几千米到几十千米的中等尺度扩散和几百千米以上、甚至全球规模的扩散。近距离的污染物扩散如工厂和火力发电站附近经常发生的工业排放物的扩散；远距离的污染物扩散甚至可以跨越国境，例如，美国北部工业区的排放物曾经对加拿大的大气环境产生污染。

2. 影响大气层中污染物扩散的气象因素

大气层的温度、湿度、降水、风和湍流、日照、云（云量和形状）都对大气层中污染物的迁移、扩散有影响，其中最重要的因素是风和湍流以及温度。

风和大气湍流。大气湍流是大气层中短时间内不同尺度的不规则运动，可以将大气看成是由许多不同尺度的涡旋（湍涡）构成。处于湍流中的含污染物的气团可被不同尺度的湍涡携带而逐渐扩散。其中尺度大的湍涡能移动整个含污染物气团的位置，与污染气团尺寸接近的湍涡对污染气团的扩散作用最明显。尺寸小于污染气团的湍涡则不能改变污染气团的位置，而仅能使污染气团的边缘模糊。大气层中有各种不同尺度的湍涡，这些湍涡的综合作用使污染物随风移动并逐渐扩散，和周围洁净的空气混合而被稀释。大气湍流的强弱直接影响对污染物的扩散能力，而大气湍流的下垫面对湍流有明显的影响。如果下垫面是水面，由于这些区域温度的日变化较小，但白天陆地上的空气受热快，水面上的空气会由底部过来补充陆地上向上运动的空气；夜晚则相反：陆地上的空气迅速冷却，并向水面吹去。这种风向的变化对污染物的运动有明显的影响。在地形复杂的区域，由于温度的分布和变化受地形影响明显，因此风向的变化也有特征，如在山区，白天有进山风，晚上则是出山风；在迎风的山坡上，有山谷风的回流；在建筑物群中，有城市热岛效应产生的城市风和建筑物的尾流，这些气流运动都影响空气中污染物的运移和扩散。

大气温度沿垂直方向的分布对大气湍流的强弱也有明显的影响。前已述及，大气在干绝热过程中，高度每增加 100m，温度降低 0.98℃，这称为干绝热减温率，当大气的温度随高度的变化（垂直减温率）大于干绝热减温率时，即大气温度随高度变化强烈时，说明大气处于不稳定状态，大气湍流有增大的趋势，有利于污染物的扩散；当大气温度随高度的变化（垂直减温率）小于干绝热减温率时，说明大气处于稳定状态，大气湍流有减小的趋势，不利于污染物的扩散。当大气的温度随高度增加，不仅不减小，反而增大时，即处于逆温状态时，空气分子向下运动，不利于污染物的扩散。

当某个地区的天气背景是由低压中心控制时，空气做上升运动，有利于污染物的扩散；但某个地区是由高压中心控制时，空气做下降运动，不利于污染物的扩散，此时如果地形地物条件有利于产生逆温时（如白天晴朗，晚上地面热辐射使空气升温，产生逆温），对污染

物的扩散不利，甚至还会发生污染事件。

除了温度和大气湍流会对大气中污染物的扩散、稀释有明显作用外，大气层的降水过程还会将污染物通过降水的形式降落到地面。雨雪在降落过程中捕获大气中的颗粒物，捕获量与雨滴的大小、颗粒物的大小和浓度有关 雪花比雨滴的体积大，降落慢，因此同样的降水量，雪花比雨滴对大气的净化能力强。但降雨在一方面减轻了空气污染的同时，也可能产生酸雨等新的污染。

3．大气层中污染物扩散的特征

在平原地区，风向和风速在某一水平面上是均匀的。某个污染源排放的污染物的扩散受当地风向及其变化的影响，在污染源下风方向受污染的次数最多。在晴朗天气的夜晚，风速较小时，在距离地面几百米处出现由于地面热辐射产生的逆温层，大气污染物的扩散能力较差。在中午，大气温度的垂直递减率可大于 1℃（大于干绝热减温率——0.98℃），在这样的条件下，由于大气温度差异和密度差异引起的湍流发展，对污染物的扩散能力加强。

在沿海和湖滨地区，由于白天和夜晚海陆风向的交替，有时低层排放的污染物被海陆风送到一定高空后，又被反向气流带回原地。由于春、夏季水面气温低于陆面，在冷水面上形成的逆温层的气流在到达暖陆面上空时，可能将在逆温层上部积聚的污染物经对流又带回地面，在短时间内会形成空气污染物浓度增加的“熏烟过程”。由于陆地的地面粗糙，与海面（湖面）有一定的温度差异，陆面和海面上空的大气稳定度是有差别的，这造成了大气污染物扩散能力的差异。总的来说，陆面的扩散能力强于海面。

在城市上空，由于热岛效应使城市上空的温度分布在白昼和夜晚都是随高度增加而递减，因此污染物随气流向上运动而扩散的趋势加强，同时、城市对气流的扰动和城市热对流产生的湍流明显高于平原上的非城市地区，因此污染物随气流较快扩散。

在山区，由于地形起伏，产生热辐射的不均匀和冷却不均匀，引起大气的热力环流（地形风），在山谷不同位置处由于受热条件和地形条件的差异，大气运动状况不同，对污染物的扩散能力也有差异。

应该说明，影响大气层中污染物运移和扩散的因素是多方面的，有各种物理化学机制和变化规律，本节仅能就与大气的热运动引起的运移和扩散作一简要说明。

五、污染物在水中的运移扩散

水中污染物种类繁多，有统计为 100 万种以上。水体污染的含义是指：排入水体的外来物质的数量超过了在水中该物质的背景值，导致了水质的恶化或破坏了水体原来的用途，或超过了水体本身对该物质的自洁能力。水体中污染物的迁移和转化包括三方面的内容：水力学的混合与扩散；污染物在水体中的物理（如过滤）和化学过程（如分解）；生物的吸收和降解。本节仅讨论有关在热场作用下的混合与扩散问题。

1．污染物在河流中的迁移和扩散

可溶性污染物进入江河后，一般会沿水流方向（记为 x 方向）迁移，即平流输送。另外，因为在河流中存在湍流，因此还可能在与水流方向垂直的横向（记为 z 方向）和纵向（记为 y 方向）扩散（湍流输送）。污染源可作为点源，复杂的污染源可视为若干个点源的组合。天然河流通常都是河流宽度远大于深度。因此，点污染源首先是在垂直于水流方向的纵向（z 方向）和横向（y 方向）上发生扩散。在图 9－1 上，污染源在河中心，在较近距离上（$x<x_1$），污染物首先在纵向（y 方向）和横向（z 方向）上扩散并沿水流方向（x 方向扩散），污染物的扩散问题可作为三维问题处理；在 $x_1<x<x_2$ 时，认为污染物在纵向

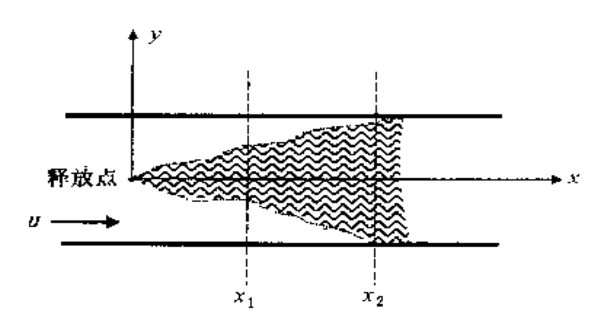


图 9－1 污染物在河流中扩散的示意图

（y 方向）的混合、扩散已经均匀，在横向（z 方向）和水流方向（x 方向）还有污染物的扩散，污染物的扩散问题可简化为二维问题；在 $x > x_2$ 时，可认为在纵向（y 方向）及横向（z 方向）污染物的扩散已经均匀，污染物的扩散仅是沿水流方向（x 方向）的一维问题。

2．污染物在湖、海中的迁移和扩散

由河流携带的污染物进入海湾时，河水中的污染物首先是随河水在表层流动，这是污染物扩散的第一阶段；第二阶段，污染物进入海湾，在湍流和潮流的作用下发生迁移扩散，污染物在海湾的滞留时间一般都比较长，甚至可达一年以上；最后，污染物随海水的湍流和潮流进入外海，与海水再发生扩散，使污染物稀释。污染物随河流进入湖泊时的迁移扩散与进入海湾相似，但由于湖泊的体积及潮汐作用都不如海洋强烈，因此污染物的扩散过程要缓慢得多。

除了海水中的盐分可能和污染物发生作用外，海洋的水动力系统有很多与河流不同的特征。如海水活动潮汐强烈，因此在邻近河口的海域，污染物的迁移和扩散会受到潮汐的影响，潮汐流和河水流会使污染物的平流输送和扩散作用明显，在一个潮汐周期中，污染物就可迁移和扩散到体积大得多的近海中。风是海水上层混合和运动的重要动力，潮流在浅海海水混合中起重要作用，这些与海水混合机制有关的过程在相当大的程度上决定了海水中污染物的迁移和自洁。海水的混合包括由分子的不规则热运动引起的分子混合和海水湍流运动引起的湍流混合两类。由于湍流运动的混合速率远大于分子运动的混合速率，因此海水中由于湍流引起的污染物和海水的混合、迁移和扩散是污染物运动的主要形式。由于表层波浪引起的海水混合所波及的深度一般都不大，因此海水中的污染物主要是在浅层沿湍流、潮流分布。

由河口向海湾的流线多呈喇叭口状，因此在水流稳定的条件下，污染物随水流呈半圆形分布（见图 9－2），而且在海洋中，污染物通常是保持在厚度为 H 的一层中，因而不需要

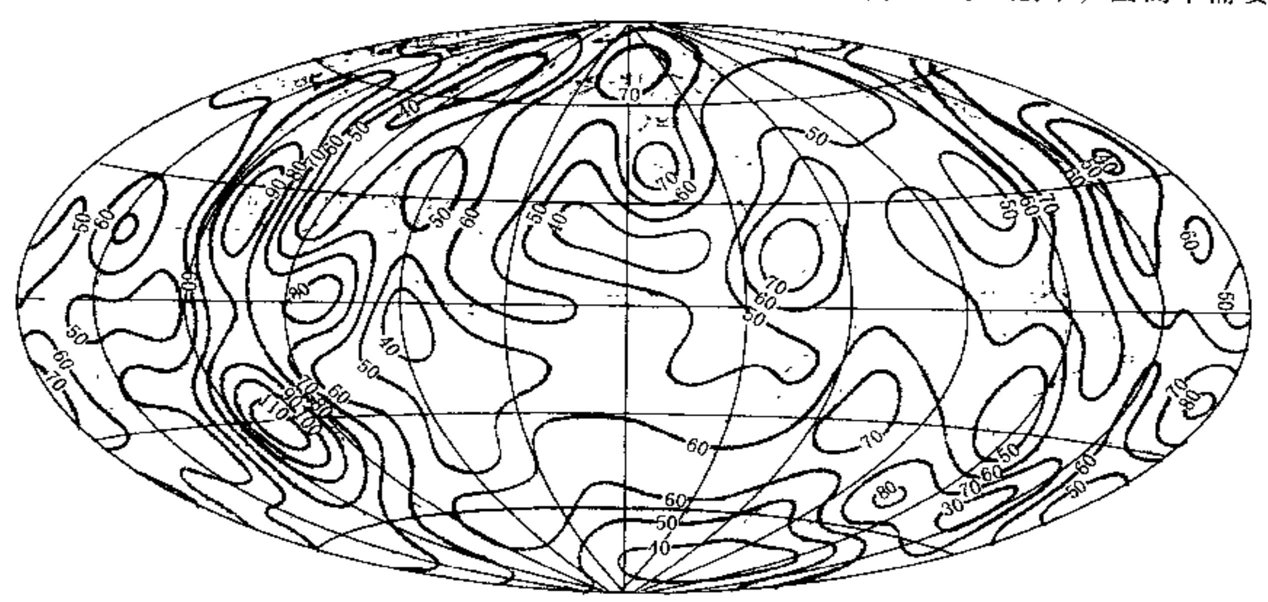


图 9－2 全球地热热流量分布图

考虑在垂直方向上的扩散。尤其是像油船原油泄露这样的海水常见污染，进入海洋后，与表层海水混合，使污染物的浓度从不均匀向沿海面均匀发展。而且这种迁移和扩散是不可逆的。

在湖泊中，湖水的流速比海水缓慢，污染物在湖泊中某个区域滞留的时间可能比在海湾中还要长。污染物的浓度除了与污染物在湖水中的停滞时间有关外，还与湖泊的大小、形状、湖水深度有关。一般湖泊存在沿岸流，这种湖水的定期、定向流动从向岸边和湖中心的往返流，在流向转换向湖心时，对稀释和扩散湖岸附近的污染物是有利的。

3. *污染物在地下水中的迁移和扩散*

污染物在地下水中的运动有以下形式：

渗流迁移。污染物随地下水在地下水的压力梯度作用下，渗透穿过储水层岩石的孔隙和裂隙。在尺寸较大的裂隙中，污染物可"自由渗流"，在尺度较小的孔隙中，污染物只能沿连通的孔隙发生"阻尼渗流"。在岩石孔隙通道的几何尺寸（直径或"喉道直径"）小于50nm时，地下水中尺寸较大的固相颗粒被"吸收"（实际是滞留在岩石的孔隙中）。

扩散迁移。地下水中污染物迁移运动的另一种形式是从浓度高的区域向浓度低的区域扩散。在地下水的实际扩散过程中，扩散过程受地下水温度、压力差和污染物浓度差控制。地下水在岩石中的运动，一般不存在湍流，基本上是按层流形态运动，因此，污染物扩散过程基本上是分子扩散引起的迁移。

渗流—扩散迁移。在天然地下水条件下污染物的渗流和扩散往往是同时发生的，而且可能相互转化。例如，地下水在压力梯度作用下沿构造较宽大的裂缝运动，此时，由于地下水运动的空间有较大的尺寸，因此渗流作用起主导作用。在孔隙通道尺寸减小及地下水的压力差减小时，渗流作用减弱甚至完全停止，此时，由于污染物浓度差引起的扩散变成迁移运动的主要形式。一般来说，在压力梯度作用下，以污染物的迁移扩散是以渗流作用为主要方式。在与压力梯度方向垂直的方向上，污染物迁移运动的主要方式是由于浓度差引起的扩散。由于含污染物的地下水的矿化度往往高于原生的地下水，因此在地下水被污染后，由各种电解质离子吸附、扩散产生的自然电位将有改变。

如果含污染物的水（往往随季节变化）与地下水的温度（往往不随季节变化，常年保持稳定）不同，则含污染物的水由于与地下水的温度不同，会形成与地下水均匀温度场不同的局部温度异常。在夏季，含污染物的水温度往往高于地下水，污染物的扩散会快些，而在冬季，含污染物的水的温度比地下水低，污染物的扩散较慢。注水开发的油田的注入水对石油的驱排、对油田水的混合和"污染"都与温度有关。

第二节　地壳的热学性质和主要热物理现象

地球内部的温度及热量传输是地球内部运动驱动力的重要方面。根据石油天然气探井和科学钻井的资料，地温随深度增加而增大。另外，地下涌出的喷泉和火山喷发出的岩浆也说明有热流从地球内部向表面流出。大陆的平均地热流为1.4μcal/（cm^2·s）（微卡/（平方厘米·秒）），海洋的平均地热流为1.6μcal/（cm^2·s）。地球表面每单位时间散失的热量为8.5×1012cal/s；全球每年从内部流出的热量约2.4×10^{20}cal。地热的主要来源是地球内部放射性物质衰变，而且主要来自长半衰期的放射性元素（^{238}U、^{235}U、^{232}Th、^{40}K等，其半衰期都在10亿年以上）。地壳内部主要生热岩石的生热率见表9－1。

表 9－1　地壳内部岩石的生热率

岩　石	生热率，cal/(g·a)	岩　石	生热率，cal/(g·a)
花岗岩	820×10^{-8}	榴辉岩	$(8\sim34)\times10^{-8}$
中性岩浆岩	340×10^{-8}	橄榄岩	0.9×10^{-8}
玄武岩	120×10^{-8}	球粒陨石	3.9×10^{-8}

有资料认为，长半衰期放射性元素每年衰变放出的热量约 2.3×10^{20}cal，接近地热热流量。而半衰期在千万年以下的放射性元素（如^{129}I 的半衰期为 1700 万年、^{26}Al 的半衰期为 730 万年）则在地球形成初期衰变产生热量，现在已经难以观察到这些放射性元素衰变所产生的热量．除了放射性元素衰变产生的热量外，地热还可能来自地球冷却和地核发生分异时产生的重力能。火山喷发和地震所释放的能量实际上可视为由地球的旋转等引起构造运动的机制引起。但火山喷发所散失的热量是地球每年流出的热流量的 1/100 以下。地震所产生的弹性波最后还是以热能的形式消失在地球内部。其总能量与地热热流量相比，则可忽略。

一、固体地球的温度

由前所述，地球内部的温度高于外部，但在地表附近十几米至几十米的地壳表层，由于太阳辐射的影响，其温度有昼夜变化、四季变化和多年的周期变化，这一层可称为外热层或变温层。在变温层的底部，有一温度常年保持为该地年平均气温的层段，即常温层。在常温层以下，受地球内部热量的影响，随深度增加温度上升，记深度每增加 100m，温度上升的数值为地温梯度或地热增温率。常温层以下，表层的平均地温梯度约为 3℃/100m；海底的地温梯度约 4～8℃/100m，陆地地区约 0.9～5℃/100m。在同样深度，海洋地壳的温度高于陆地地壳的温度。在不同的大地构造单元，地壳的温度也有差别，一般规律是，年轻的构造活动区的热量流动较强烈，相应的地温也比稳定地区相同深度处地壳的温度高。在地面以下几十千米处，地温梯度减小，否则地面以下几百千米处的温度将使地壳底面的橄榄岩融化。根据公认的推算值，在莫霍面附近，地温约 400～900℃，岩石圈底面（深度约 110km 处）温度约 1100℃。在深度为 670km 处地幔的温度为 1640℃；地幔和地核分界面上的温度约 2852℃（3125K）；地核内外边界处的温度约 3477～4477℃（3750～4850K）。

海洋地壳厚度平均约 6km，其上覆盖约 4.5km 的海水。海底地壳分为三层，最上层的厚度约几百米以内，其热导率（见下）较低，温度随海底各区域大地地热流（见下）的不同为 6～22℃，中间层的厚度约 1km，热导率较高，温度随地热流不同为 20～80℃，最下层厚度约 4km，热导率最高，温度随地热流不同为 69～272℃。海底地壳的地热流、温度梯度和温度都比陆地下面的地壳高，尤其是温度差异可达 100℃以上，但这一差异在几百千米以下将不再存在，因为若存在这种温度的明显差异，则由于海底和陆地下面在同一深度处的温度不同，其热膨胀不同，其密度必有差异，因而在地表将会观测到重力的差异。但在地面，还没有观测到这种重力差异，说明在海底和陆地深度为几百千米处并没有明显的密度差异，因而也不可能有过大的温度差异。即在地面以下几百千米处，海底和陆地下面的介质的地温梯度、温度都相当接近。

二、地球介质的主要热学性质

1. 地球介质的热导率

前已述及，介质的热导率 κ 表示在一定温度差时，单位面积和单位时间内传递的热量。介质的热导率与其元素成分、矿物组成和分子结构有关，岩石的热导率还和岩石的孔隙—裂

缝发育程度、孔隙—裂缝中的介质（气体或液体的种类、性质）有关。空气、水、石油和部分岩石矿物的热导率见表9－2。

表9－2 空气、水、石油和部分岩石矿物的热导率

介质或岩石矿物名称	热导率，W/（m·K）
空气（27℃时）	0.024
水（0℃时）	0.56
冰	2.23
石油	0.14
石英岩	7.6
变质岩	>2.0
石墨	5.02
方解石①	2.93～3.76
石膏	1.26
云母	0.75
大理石	2.93
岩盐	6.28

①垂直于晶轴时为2.93，平行于晶轴时为3.76（W/（m·K））。

介质的热导率是随温度升高而变化的，通常随温度升高，流体介质的热导率下降。例如，水在4.1℃时的热导率为0.54（单位为W/（m·K）下同），20℃时为0.59，80℃时为0.64，90℃时为0.66。再如，空气在273.1K时，热导率为0.0237，310K时为0.0255，380K时为0.0309。

各类矿物中，以金属矿物的热导率最高（如银的热导率为：414.49W/（m·K），金的热导率为：293.07W/（m·K），铜的热导率为：383.51W/（m·K））。在各类岩石中岩浆岩和变质岩的热导率数值较大，但变化范围不大。侵入岩中超基性岩的热导率最高，花岗岩其次。沉积岩热导率变化范围大的原因是其孔隙中有热导率低的流体介质（水、空气等），陆相沉积的可燃性有机岩类（泥煤、褐煤、炭质油页岩）的热导率较低；陆相的泥质沉积岩的热导率也较低；致密及结晶的沉积岩，如碳酸盐岩和石英质岩的热导率较高。碎屑岩中，随组成岩石的颗粒变小，其热导率降低。与流体介质不同，矿物岩石的热导率随温度升高而下降，特别是在温度升高为473～700K时，热导率下降明显。在室温下，随压力增大。矿物岩石的热导率升高，在压力从1atm（大气压）增加到100atm时尤为明显。在压力超过100atm后，矿物岩石的热导率随压力增大变化缓慢，甚至趋近一个常数值。

2．*大地热流*

由于地球内部的温度比外部高，因此必然有热量从地球内部流出，直到到达地表，这就是大地热流，其量值称为大地热流量，记为 q。大地热流量 q 等于岩石热导率 κ 和地温梯度 dT/dz 的乘积：$q=\kappa\cdot dT/dz$。大地热流量的单位为：μcal/（cm^2·s）（微卡/（平方厘米·秒）），统称为热流量单位（简记为HFU），用国际单位制单位时，热流量单位为：mW/m^2

(毫瓦/平方米)；1HFU = 1μcal/（cm^2·s） = 41.86mW/m^2。全球每年由内部流出的地热流的总热量约 2.4×10^{20}cal。

从 1939 年开始，进行大陆热流量测量，1952 年开始进行海洋热流量测量，到 20 世纪末，全世界约积累了近万个地热流的测量数据，但这些数据的地理分布不够均衡。我国在 1978 年才发表了对华北地热流测量结果的 17 个数据，1983 年，又在西藏南部测得两个高地热流数据。我国的地热流数值在 0.95～1.43HFU 之间，高值区在西藏南部、滇西地区。中国大陆地区的地热流分布总体上是西南高，西北低，东部略高，中部则是过渡带。

对全球地热流热流量测量数据的研究表明：海洋和陆地的地热流量几乎相等，根据 20 世纪后期对 3127 个测量数据的统计分析和研究表明，全球的热流量平均值 $q_{全}$ = 1.47 ± 0.74HFU；陆地的热流量平均值 $q_{陆}$ = 1.46 ± 0.46HFU；海洋的热流量平均值 $q_{海}$ = 1.47 ± 0.79HFU。这个结果与原来预期的陆地的热流量大于海洋的热流量预计有差异。原来的预期结果是，地球的热流来源于地壳中花岗岩所含放射性元素的衰变，由于海洋洋底的地壳缺失花岗岩层段，因此海洋的热流量要比陆地低得多。实际观测结果否定了预期的假设，现在对陆地和海洋热流量接近相等的解释是：由于陆地和海洋地壳放射性元素含量的差异所产生的海洋热流量的不足，是依靠地壳下面地幔的热对流来补充。也就是说，大陆地壳的热量主要来自放射性元素的衰变，海洋地壳的地热流主要来源于上地幔的热对流。

地球上的热流量分布与现代地壳运动和构造运动的某些结果是一致的：按板块构造学说，高温炽热物质在海洋的洋脊处上升并形成年龄较轻新的洋壳，而海沟处的冷却的年龄较老的岩石板块则重新楔入地幔软流层。因此，热流量应该随海底岩块的年龄的增加和距洋脊的距离的增大而减小。实际测量结果是：全世界洋脊的热流量平均值为 1.90 ± 1.48HFU；海盆为 1.27±0.53HFU；海沟为 1.16±0.70HFU。

在陆地上，大地地热流量与地质构造单元及其年龄间还有依存关系。总体上说，越古老越稳定的地质构造单元，热流量越小，反之，越年轻、构造运动活跃的地质构造单元，热流量越高，对这种预期结果的解释是：年龄老的地质单元，地壳的分异程度高，长期剥蚀作用使富集于地层中的放射性元素含量日益减少，总的生热量减少。观测结果表明：前寒武纪地盾的热流量平均为 0.91 ± 0.02HFU，其中澳大利亚地盾和波罗的海地盾的热流量为 0.70HFU，北美陆台为 0.80HFU；加里东造山带为 1.11±0.07HFU；海西造山带为 1.24± 0.03HFU；中生代褶皱区为 1.42±0.06HFU；新生代地槽区为 1.75±0.06HFU，其中美国盆地山脉构造活动区热流量为 1.4HFU。这些数据都与板块学说的预期结果一致。例外的是，美国西部内华达山区的热流量仅 0.4HFU，呈现低值，其原因是该区山脉下面有一个古老的岩石板块，可视为“冷源”。

由于现代地质构造运动的结果，在构造运动强烈的部分热流量变化大。用热流量的标准差 σ 作图，发现 σ>0.5 处，恰是板块的边缘。地热热流量还和油气藏分布有关，地热流值高的区域，有利于地层中的有机物转化为烃类，因此，油气藏多在地热流值高的地区。全球地热热流量分布图见图 9－2。

三、地热资源

前已述及，地球的内部是炽热的，并有热量不断从地球内部流向地表。有一种形像的比喻认为，地球像一个刚从炉子里拿出的大煤球：外表虽然冷却，但内部仍然炽热，而且越向里面温度越高。因此，地球内部的蕴藏大量热量，其中有相当部分可开发作为能源，人类对地热资源的开发，我国早在东周时期。国外闻名和有记载的可上溯到古罗马时代。

1. 地热资源的类型

根据地热资源的温度和位置，可分为以下类型：

蒸汽型。以压力和温度较高的蒸汽形式储藏在地下的，可直接用于发电或用做机械动力，开发比较容易，但蒸汽型资源只占地热资源总量的0.5%。美国的盖瑟尔地热田就是蒸汽型地热资源。

热水型。以热水或水汽混合的湿蒸汽形式储藏在地下，按热水的温度分为低温型（90℃以下）、中温型（90～150℃）和高温型（150℃以上，最高可达300℃）。热水型地热资源分布广，约占地热资源总量的10%，而且容易开发。北美阿拉斯加的“万烟谷”是世界闻名的热水型地热田，在24km^{2}面积内，有约万个蒸汽或热水的喷孔，每秒钟喷出23×10^{6}kg的热水或蒸汽，其最低温度为97℃，最高甚至可达645℃，相当于每年燃烧600万t标准煤所产生的热量。北京小汤山温泉也属于热水型地热资源。

地压型。是以高压水的形态封存在地下2～3km处的沉积盆地中，通常由不透水的页岩封闭，是地下高压热水库，所储藏的能量有高压机械能、高温热能，还有伴生甲烷的化学能。这种类型的地热占总量的20%，有重要开采价值。

干热岩型。蕴藏在地下炽热的岩石中，不含蒸汽和水，约占地热资源总量的30%。但由于干热岩体的破碎和水在炽热岩体中的循环都是难解决的技术问题，因此这类地热资源难以开发。

岩浆型。以熔融或半熔融状态存在于地下岩浆中的热能，埋藏深度多在10km以下，温度可达1500℃。在有火山的地区，埋藏深度较浅。岩浆型地热占地热资源总量的40%。但这种资源难以开发利用。

从地质构造的角度说，板块构造的边缘具有形成地热资源的有利条件。局部的温泉和地热水出露点，往往出现在两组以上断层的交汇区。在地球物理勘探的成果图上，电阻率低和地震波速度低是地热资源带的明显特征。我国西藏的羊八井地热资源勘探就是将地热资源区圈定在电阻率低于30Ω·m的范围以内。全世界的地热资源分布在环太平洋地热带，包括美国、墨西哥、新西兰、菲律宾、中国东南部、日本的大型地热资源带；大西洋中脊地热带，是大西洋板块的开裂部分，包括冰岛至亚速尔群岛的地热资源；红海、亚丁湾、东非裂谷地热带，包括吉布提、埃塞俄比亚、肯尼亚等国的地热资源带；中亚地热带，包括俄罗斯、哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦和我国新疆的地热资源带。这些地热资源带都分布在大板块构造或大断裂的边缘。

2. 我国的地热资源

我国的地热资源则分为四种类型：台湾和云南、西藏的火山岩型；东南沿海的辽东半岛的新生代花岗岩型；松辽、华北、柴达木、江汉等与含油气资源有关的盆地和古潜山类型；四川和贵州的石灰岩山地型。我国19个省、市、区都发现地热资源，出露地表的温泉多达3500处（温度在100℃以下）。根据预测，在距地表2000m以内的地热资源是现代技术条件下有可能开发利用并有经济效益资源，根据预测，我国这类地热资源量约13711亿t标准煤，若可采率按1%计，则有137亿t标准煤的可采地热资源量。已探明的地热储量相当于31.6亿t标准煤，预测储量可达116.6亿t标准煤，远景储量可达1353.5亿t标准煤。我国的地热资源主要分布在构造活动带，如藏、滇、川活动带和东南沿海的闽、赣、粤、台地区，以及辽东和胶东半岛。在西藏、云南和台湾有温度高于150℃高温地热资源，例如，在西藏的羊八井曾经打出一口水温高达329.8℃的高温地热井。另外，在我国的中新生代沉积

盆地都有地热资源，例如在华北和京津唐地区，已发现地热点2000多处。全国经过各种勘察的地热资源点有738处，以温度低于150℃的中低温资源为主。已经探明的可开采地热水量为247.016万m^3/d，可利用热能约431.896万kW，每年可提供的热量相当于464.4万t标准煤。根据地质矿产部矿产资源储量局1996年统计，全国开发利用地热水总量为93.67万m^3/d，年利用地热总量相当于192.74万t标准煤，约占能源消费总量（1996年为17.24亿t标准煤）的0.1%。

我国地热资源的特点是分布面广，除了上海和宁夏外都发现了可开发利用的地热资源。全国已经发现地热的天然露头3136处（1992年，《中国地热资源开发利用规划》）。地热资源的分布与地热流的高值区一致。根据对738处地热资源露头的勘探结果认定，我国除了西藏的羊八井和羊易地地热田是高温地热田（150℃以上）外，其余均为中低温地热田，其中温度在90～150℃的有26处，占勘察总数（738处）的3.8%；温度在90℃以下的有708处，占96%。全国已经勘察过的地热田的平均温度为55.5℃；西藏地热田平均温度最高，达88.6℃。我国地热田的规模以中小型为主，在已经勘察过的738处地热田中，热能提供量为5000kW以上的大型地热田和热能提供量为10～50kW的中型地热田共55处，占7.5%，但可开发利用的热能达331.09万kW，占总量的76.7%；小型地热田683处，占92.5%，可开发利用的热能仅100.8万kW，占总量的23.3%；平均每个地热田可开发的热能仅1480kW。已经经过勘探的738处地热田中，已开发利用的有434处，约占60%。在有水质分析的493处地热田中，矿化度小于1g/L的有327处，占66.3%，大于3g/L的仅42处，占8.5%。矿化度低的地热水适宜多种用途。从开发利用的前景来看，构造隆起区，已有地面露头的、深度约300～500m的中、小型地热田的开发利用最经济合理。开发潜力最大的是大型沉积盆地中的深度在1000m左右的地热田。

在西藏拉萨西北约60km处的羊八井地热田是我国开发利用最大的地热田，其储层为第四系更新统砂岩、砂砾岩孔隙热储层是羊八井地区目前的主要开采层，埋藏深度50～130m，厚度为10～40m，地热水温度为141～172℃，井口温度为120～147℃。其中井口温度130℃以上，可用于发电的中、高温地热水分布面积5.656km^2，井口温度在40℃以上地热水分布面积为14.62km^2。单井汽水产量72～169.7t/h，其中蒸汽量9.13～25.8t/h，喷出热水的矿化度为954～1853mg/L。

羊八井地热田的另外一套热储层是第三系喷出岩和喜马拉雅期花岗岩等岩层裂隙热储层，浅部储热层埋藏深度240～450m，热储层温度157℃左右，这一层已经开采利用。深部热储层的埋藏深度在950～1338m，热储层的平均温度达247℃，最高达251℃。单井汽水产量可达302t/h，估计发电潜力可达125.8万kW。地热水的矿化度为2.8g/L，水中含锂、氟、偏硅酸、偏硼酸等极具医疗价值的成分。目前羊八井开发利用的是埋藏较浅的地热水，日产热水量达109500m^3，用于温室供暖和发电，目前有7台发电机利用蒸汽发电，装机容量2.5万kW。

从表9-3可见，我国的地热田主要在西南，地热资源最丰富的是西藏，其次是云南、广东、河北和天津，以上6省（市、区）已探明的地热资源约占全国总探明地热资源量的3/4。

表 9－3　中国各地区已探明的地热资源

地区	地热田数目，个	可采水量，m^3/d	热能，万 kW	折算标准煤量，万 t	所占百分比，%
华北	56	447734	74.533	80.09	17.27
东北	43	74390	10.925	11.76	2.53
华东	182	304642	42.781	46.05	9.92
中南	165	696295	68.775	73.79	15.89
西南	218	701482	220.445	237.08	51.05
西北	74	245619	14.437	15.53	3.34
全国	738	2470162	431.896	464.40	100.00

注：资料引自，朱训等，《中国矿情》，科学出版社，1999。

3. 世界地热资源的开发利用

目前世界各国开发利用的地热资源主要是蒸汽型的和热水型的，可用于医疗保健、温室养殖、取暖，温度高于 180℃热水和蒸汽可用于发电。意大利的拉德雷诺在 1904 年建成的地热发电站是世界上最早的用低热蒸汽推动涡轮机发电的电站，但功率很小，仅能点亮 5 盏电灯。但以后地热发电发展很快，已经有 20 多个国家用地热发电。美国是世界上利用地热发电最多的国家，但地热发电仅占全国能源消费的 0.0036%（1995 年）。

据世界银行的《世界资源报告（1998～1999)》统计，1995 年全世界地热发电量已达 48.040 亿度（kW·h），占当年全世界发电量 13097.664 亿度的 0.34%，但其增长速率是最快的，与 1985 年相比，发电量增加了 69%。同期，全世界发电量增加了 34%；其中火电增加 32%（占总发电量的 62.9%），水电增加 27%（占总发电量的 19.3%），核电增加了 56%（占总发电量的 17.3%）。

表 9－4　世界部分国家地热发电装机容量统计

国　家	1995 年装机容量，10^3kW	2000 年装机容量，10^3kW
美　国	2810.70	3395.00
菲律宾	1227.00	1978.00
墨西哥	753.00	960.00
意大利	631.70	856.00
日　本	413.70	600.00
印度尼西亚	309.75	1080.00
新西兰	286.00	440.00
萨尔瓦多	105.00	165.00
哥斯达黎加	55.00	170.00
土耳其	20.60	125.00
俄罗斯	11.00	110.00

注：资料引自 1995 年国际地热大会统计资料（意大利，1995，3，18—31）；
2000 年装机容量为 1995 年预测值。

地热供暖是发电以外的又一地热利用项目，冰岛首都雷克亚未克每小时可从地下抽7740t温度达80℃的热水供11万居民使用，全城除机动车外不燃烧矿物燃料，是全世界最清洁的城市。地热水还可用于养殖。例如，北京利用地热水养殖非洲鲫鱼，已经有一定规模。据世界银行在20世纪90年代初的不完全统计，世界直接利用的地热水量远远超过地热发电量。将开发的地热水总量折算为发电量，约365亿度，其中日本居首位，约87亿度，中国第二，约56亿度。近年来，中国地热水用量已经相当于597万t标准煤的发热量。

预计21世纪，地热资源将得到更大规模的开发利用，高精度的地热勘探技术将逐渐代替目前还广泛应用的石油天然气勘探技术；随对地热勘探的投入增加，探明的地热储量会明显增加；对地热能源开发利用的成本会逐步降低，在经济上更加可行，地热发电的装机容量将会大幅度提高。

地热资源虽然被当作“清洁能源”，但用管线输运热水的距离一般不超过100km，用管线输送蒸汽的距离则在10km以内，因此地热资源往往只能在产地有使用价值。另外高温地热水在输送到地面或在管线中会因所含矿物质的沉淀而结垢，有的地热水含硫化氢等腐蚀性物质，除了腐蚀管线外，还可能污染空气；高矿化度或含有害成分的地热水的排放可能污染浅层地下水或地表水；过热的地热水排放还可能产生热污染；长期大量开发浅层地下水还可能造成地面沉降。这些都是地热资源开发利用应该注意的问题。

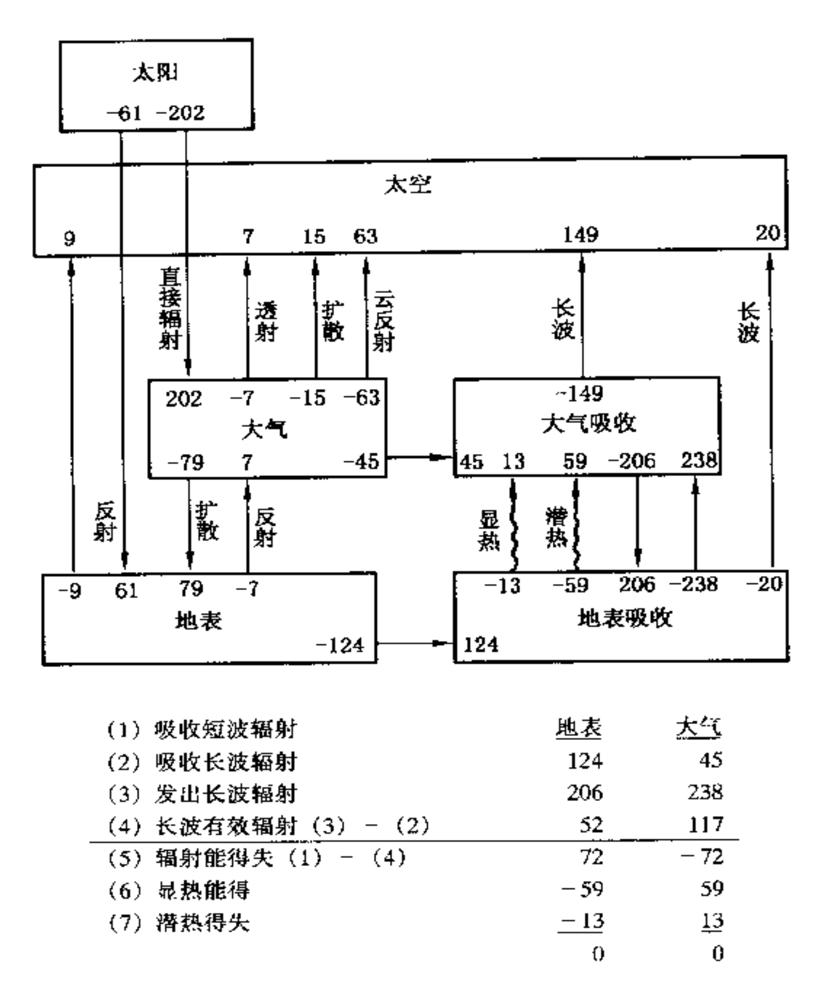
第三节　地球的热平衡与生态环境及热污染问题

广义地说，地球上的全部能量都来自太阳；狭义地说，人类使用的能源来自自然界的太阳能、地热能和主要是化石或矿物燃料以及核能等不可再生的能源和水力、风力、潮汐等可再生能源。太阳辐射是地球上生命现象的重要条件，是生命现象的动力。具体来说，太阳辐射和地球上的热平衡，以及由此决定的地表的平均温度是地球上生命和生物演化的最根本条件。

一、太阳、大气和地面的热平衡

太阳平均每分钟向地面单位面积辐射1.96cal能量（太阳常数），但实际到达地面的太阳能随太阳和地球的相对位置变化，长周期的有冰期的变化，短周期的有四季的变化。即使在同一时间，在地球上的不同地理位置，接收到的太阳辐射也有所不同。大气层中的臭氧、水蒸气、二氧化碳还会对到达地面的太阳辐射强度有明显影响。在大气层的上部，太阳辐射主要是使氧分子分解，生成臭氧，并在距地面20～50km处形成臭氧层。臭氧层又能大量吸收太阳的紫外辐射，对地面生命现象有保护作用。在大气层的下部，水蒸气和二氧化碳吸收了相当部分的长波辐射。因此，到达地面的主要是太阳辐射中的短波部分。

大气层中的气体分子、云、尘粒还对太阳辐射有反射和散射作用，一般来说，大气层中较大的颗粒对太阳辐射有较强的反射作用，较小的微粒则有较强的散射作用。穿过大气层的太阳辐射，包括直接辐射和经散射的部分，到达地面后，一部分被地面反射，另一部分被地面吸收生热，再向大气层反射，这两部分热量又大部分被大气层中的水蒸气和二氧化碳吸收。这样相当一部分的太阳辐射以热的形式存在于地面和大气层的下层，使地面和大气层下部的温度升高，这就是所谓“温室效应”。由于温室效应，地面的平均温度约为15℃，若地球没有大气层，不产生温室效应，则地面的平均温度将在－22～26℃间变化，这对地球上生命过程的影响将大不相同。图9－3是太阳、大气和地表的热平衡。



	地表	大气
（1）吸收短波辐射		
（2）吸收长波辐射	124	45
（3）发出长波辐射	206	238
（4）长波有效辐射（3）－（2）	52	117
（5）辐射能得失（1）－（4）	72	－72
（6）显热能得	－59	59
（7）潜热得失	－13	13
	0	0

图9－3　太阳、大气和地表的热平衡

（图中的数字表示热交换量，单位是 kcal/（cm^2·a）（千卡/（平方厘米·年）），负号表示地球系统能量输出，无负号表示太阳向地球系统输入能量）。

在图9－3中，还有一部分热量是对流、传导方式在地面和大气层间交换热量，即显热交换；还有一部分则是以水的相态变化，即在蒸发或汽化、凝结（水）、凝固（冰）、升华过程中，在大气层和地面发生的潜热交换。

为了说明地球上某一区域地面与外界的热交换关系，可将被研究的区域设想为向上延伸至太空，向下延伸到一定深度的底面（该底面上的垂直热流等于零）的柱体，则被研究区域获得的净辐射能为：

$$R = (Q - q)(1 - \alpha) + I\downarrow = I\uparrow + H + L_e + F + G \qquad (9-3)$$

式中　Q——太阳直接对地面的短波辐射量；

q——天空对太阳短波辐射的散射量；

α——地面对太阳辐射的反射系数；

$I_\downarrow$ 和 $I_\uparrow$——到达地面的和从地面向上的长波辐射；

H——地面与大气层交换的显热量；

L_e——地面与大气层交换的潜热量；

F——柱体在水平方向与外界交换的容量；

G——所假设的柱体储存的热量。

公式（9－3）实际上是表述一种热平衡状态：地球上某一区域获得的热量等于从太阳直接获得的短波辐射热（扣除大气层中散射的部分和地面的反射）以及地面获得的长波辐射。这些热量变成向上的长波辐射，地面与大气层交换的潜热和显热，还有一部分是储存在该区域中的热量。R、L_e、F、H 是地球上表示某个区域热环境的特征系数，其数值见表 9－5。

表 9－5　地球上不同纬度区域的热环境系数　　单位：kcal/（cm^2·a）

纬度区域	海洋				陆地			地球			
	R	L_e	H	F	R	L_e	H	R	L_e	H	F
N80～90								－9	3	－10	－2
N70～80								1	9	－1	－7
N60～70	23	33	16	－26	20	14	6	21	20	10	－9
N50～60	29	39	16	－26	30	14	11	30	28	14	－12
N40～50	51	53	14	－16	43	24	21	48	38	17	－7
N30～40	83	86	13	－16	60	23	27	73	39	24	－10
N20～30	113	105	9	－1	69	20	49	96	73	24	－1
N10～20	119	99	6	14	71	29	42	106	81	16	9
N0～10	115	80	4	3	72	48	24	105	72	11	22
N0～90								72	55	16	1
S0～10	115	84	4	27	72	50	29	105	76	10	19
S10～20	113	104	5	4	73	41	32	104	90	11	3
S20～30	101	100	7	－6	70	28	42	94	83	16	－5
S30～40	82	80	8	－6	62	28	34	80	74	11	－5
S40～50	57	35	9	－7	41	21	20	36	53	10	－7
S50～60	28	31	10	－13	31	20	11	28	31	11	14
S60～70								13	10	11	14
S70～80								－2	3	－4	－1
S80～90								－11	0	－11	－1
S0～90								72	62	11	－1
全球	82	74	8	0	49	25	24	72	59	13	0

注：资料引自 M.N.Будыко：《地球热量平衡》气象版社，1980，北京。

从表 9－5 的数据看，南北半球接受的太阳辐射接近，但北半球低纬度地区要向高纬度地区输送热量，因此地面与大气层的显热交换略大于南半球，或可说明北半球的气流等天气现象明显；南半球的地面（包括海面）与大气层的潜热交换略大于北半球，或是由于南半球海洋面积大于北半球，海水的蒸发、凝结过程交换的潜热更明显，并以这种形式向北半球输送热量。从表 9－5 的数据还可看出，在赤道附近获得的太阳辐射热量（R）要比两极附近约大 4 倍；相应的，通过蒸发和凝结交换的潜热（L_e）在赤道附近也比在两极附近约大 3 倍。通过空气对流和传导在水平方向交换的热量（F）在赤道附近是正值，而在两极附近是负值。某一区域的热环境取决于该区域从日地关系变化中所获得的热量的得失，而表征热量得失的物理量就是上述的 R、L_e、H、F 等 4 个参数。而直接表述热环境状态的物理量则

是地面温度、大气温度，以及与潜热交换有密切关系的水蒸气分压和大气流动速度。这些状态参数与某个区域的热量得失的变量间的关系是环境热学关注的最重要的问题。

二、海流和海水中的热平衡

海水中的热平衡问题，除了海洋和大气层之间的蒸发、凝结降水，结冰、融化等潜热交换以及海面大气环流和风暴产生的显热交换以外（见前节所述），通过海流交换热量使之达到热平衡。

海水中除了太阳和月球的引力引起的潮汐运动以外，还有由于地球自转引起的海流、海面上风引起的海流以及纬度不同的各海域由于海水温度不同、所溶解的盐的含量不同产生的密度差异引发的海流。海流有不同规模的水平方向的流动（例如，由风和地球自转引起的海流），也有沿垂直方向的升降流（例如，由于潮汐引起的海流和赤道附近，海面的风产生海水的风漂流，致使底层或次表层的海水向上涌动）。海流按其水温高于或低于所流经海域的水温，分为寒流和暖流两种，寒流来自水温低处，暖流来自水温高处。表层海流的水平方向速度为几个 cm/s 至 300cm/s；深层海流的水平方向速度在 10cm/s 以下；垂直方向的海流的速度为几个 cm/s 至几十 cm/s。

在赤道附近海域，由于北半球东北信风带和南半球东南信风带的影响，形成由东向西的北赤道流和南赤道流（见图 9－4），这就是大洋表层的风生环流。当流向大西洋海岸的南北赤道流受到大西洋海岸的阻挡，西面水位升高（其梯度为 4cm/100km），并改变流向，北赤道流流向改向北，南赤道流流向改向南。在北半球，这股暖流在太平洋叫做黑潮，在大西洋叫做湾流。北半球从赤道附近获得的热量的一半以上是由这股暖流输送的。湾流的最大水平速度可达 200～300cm/s，厚度可达 4km，宽度最窄处为 100～150km，流量则可达 1.5

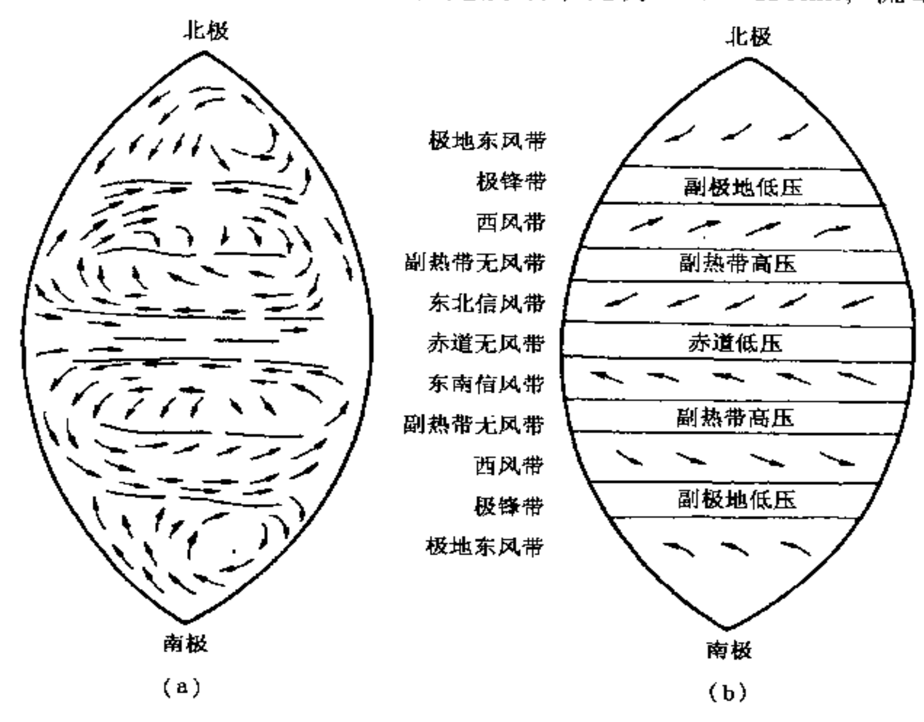


图 9－4 地球海洋表面环流和风带分布

(a) 表面环流；(b) 风带分布

亿 m^3/s；黑潮的最大水平流速可达 200cm/s，厚度可达 3km，宽度最窄处约 100km，流量可达 0.65 亿 m^3/s。如此大量的暖水从南向北的流动，对流经沿岸区域的气候有明显影响。例如，在大西洋东岸的加拿大北纬 55°～70°区域，年平均气温为 －10～0℃，而受湾流影响，相同纬度的欧洲西部海岸，年平均气温达 0～10℃。此外，暖流区域的大气层底面温暖湿润，附近区域雨量充沛，有利于农作物生长。

在南北半球中纬度海域，受西风带的影响，海水自西向东流动。在北半球中纬度海域盛行的海流在东岸受阻，形成向南和向北的两股海流。在南半球，这股从西向东流动的海流没有海岸的阻挡，因此在南极附近绕地球一周，称为南极环极流。在南北半球的高纬度区域，由于东风盛行，海水从东向西流动，这就是极地东风海流，在遇到陆地阻挡后，将转向北。这就是地球上不同纬度区域的三种主要海流，即发自低纬度海域的、从东向西后遇到陆地转向的、水温高的热带环流（湾流和黑潮）；中纬度海域产生的、从西向东的温水环流；在极低附近海域的从东向西的极地环流。上述各种海流组成海洋的环流系统，并维持海洋的热平衡。海流对海洋中的各种物理过程、化学过程、生物过程、地质过程和全球及局部地区的天气过程与生态环境都有明显的影响。

三、热环境对生命活动和人体的影响

在第八章中已经通过表 8－2 说明生物的演化和发展，特别是某一类生物物种的发生、发展和衰亡都和地球的平均温度有一定关系。例如，古生物学中的恐龙只能在温度条件适宜的中生代出现，而冰期的出现是地球上许多物种灭绝的重要原因。这是从大的时间尺度说明温度及与之有关联的地质年代与生物的演化有关系。另外，还应看到，在很短的时间尺度内，温度的变化也会改变某一生物物种性态，或者说，某些生物只是在一定的温度下才能适宜生存。

最明显的例子是温度对水生生物的影响，水的任何物理性质都和温度有关，如水的粘度随温度升高而降低，这会使水域中浮游物、饵料的运动改变；另外，淡水中溶解氧含量都随温度升高而降低，在标准气压下，10℃时溶解氧含量为 11.3mg/L，20℃时为 9.17mg/L，30℃时为 7.63mg/L 由于水温升高使溶解氧含量降低，而河流的自洁作用需要消耗水中的溶解氧，可导致水体缺氧，并使一些水生生物（如鱼类）死亡和某些细菌（如大肠杆菌）大量繁殖。水温变化、流量变化以及因此引起的化学变化、对水生生物的种类和数量有明显影响。例如，湖水中，20℃时硅藻类占优势，30℃时绿藻占优势，40℃时，湖水有异味、不适宜鱼类生存的蓝绿藻占优势。美国南部的许多河流曾由于热污染，使水草风信子一类植物疯长，影响航道安全。

水生生物随水温变化可能引起生态系统的调整以适应水温的变化；有些生物则在水温变化时，某些系统（如呼吸系统）的活动变缓，甚至窒息死亡；有些水生生物在周围水域温度升高时，如某些鱼类会徊游，向温度适宜生存的水域迁移；某些鱼类在水温变化时，其繁殖能力也会有明显变化。此外，水温的变化对可游动的鱼类、附着在岩礁上的贝类的影响也有差异。表 9－6 列出了某些水生生物适宜生存的温度。

热环境对人类活动的影响是环境热学关注的又一重要问题。由于自然原因产生的冷热和温度变化，是很难令人适应的，人类建筑的房屋、使用的暖气、空调设备都是为了建立一个一定范围的、适宜人类生存的人工热环境。人在其生命过程中无时不在与周围进行热交换。人体与周围环境之间的热平衡关系可表示为：

$$S = M - (\pm W) \pm E \pm R \pm C \quad (9-4)$$

式中 S——人体储热量；

M——人体新陈代谢消耗的热量；

W——人体摄入食物转换的热量（+W）和人体做功消耗的热量（-W）；

E、R、C——人体蒸发、辐射、对流消耗的能量。

表 9-6 某些水生生物适宜生存的温度

水生生物名称	适宜生存温度,℃
对虾	25~28
海蟹	24~31
牡蛎	15.5~25.3
鲤鱼（养殖）	25.5~28.5
鳍鱼	20~28
比目鱼	3~4
沙丁鱼	11~16
墨鱼	11.5~16
金枪鱼	22~28

人体的温度维持在37℃左右，在环境温度变化时，人体与环境的热平衡将发生相应的变化，即通过调节新陈代谢的速率，改变皮肤与环境的热交换（出汗、增加衣服保暖等）来建立新的平衡。人体与环境之间的热平衡的实验结果如图9-5。

在图9-5中，环境温度为25~29℃时为中性区，人体与外界的热交换稳定，人体产生的热量与散失的热量接近，人感觉舒适；如果环境温度过低，人体向外散失的热量增多，人有冷的感觉。一般来说，当环境温度为-35℃时，人穿着高效保暖的服装可在户外活动，这是人能在户外活动的最低温度极限（有人曾在-75℃环境中活动30min未冻伤，但这属于个别情况）。环境温度低于18℃时，人

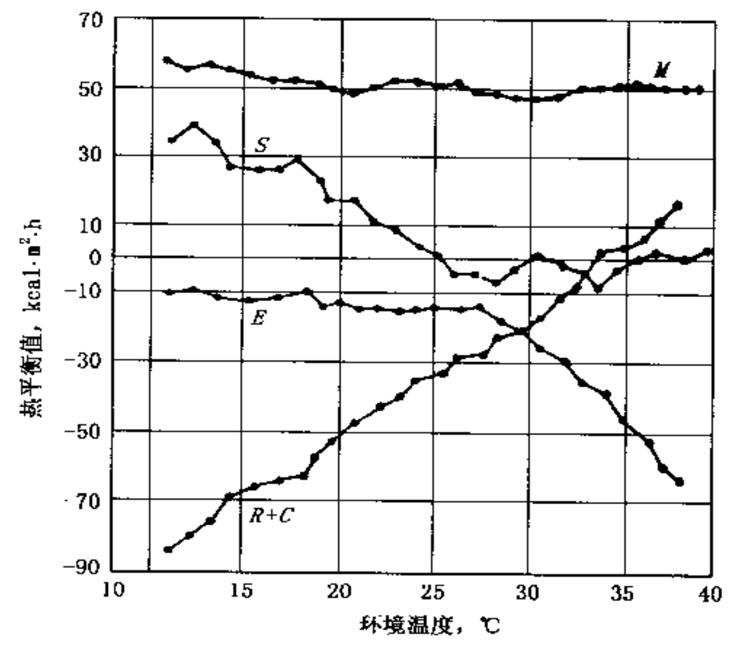


图9-5 人体与环境之间的热平衡

开始感觉冷，在环境温度低于10℃时，人体明显感觉冷，而且活动开始出现障碍。低温可以使人冻伤。但温度不同产生冻伤的时间又不同。例如在5～8℃时出现冻伤要几天时间，在-73℃时，暴露12s即可产生冻伤。冻伤多发于人的手、足、鼻尖、耳廓。冻伤分为三度。一度冻伤为出现红斑和肿胀，一般可恢复；二度冻伤为水疱性冻伤，经治疗可恢复；三度冻伤为肌体组织坏疽，一般难以复原。在环境温度为-20℃时人体皮肤与金属接触时，会发生“冷金属粘皮”，即皮肤被金属粘住，这是一种特殊的冻伤。在环境温度为-1～6℃时，人体可以通过调节，使体内温度维持在约34℃。当由于环境温度进一步降低，使人体温度降到30℃时人的意识开始模糊，体温降到27℃时，人体的意识丧失，各种神经反射消失，濒临死亡。但人在低温环境（如-20℃）时，若无足够的御寒衣物，则可以通过体力活动，使人体产生大量的热（剧烈活动时，人体每小时可产生1400kcal的热量）以维持体温。

在气温为20℃以下时，人体的散热可以有对流、传导、辐射等多种形式；在气温超过26℃时蒸发散热明显增加，在环境温度升高到29℃以上时，人体从体内传递到体表的血流量比在中性区高2～3倍，皮肤的温度可升高到仅比体内低1℃，通过体表的汗液蒸发，使人和环境到达热平衡；气温达到38℃时蒸发散热成为人体散失热量的唯一方式。当人体的温度超过正常体温（37℃）2℃时，人的机体能力开始下降和逐步丧失；人体的皮肤温度到达41℃以上时，会受到灼伤，体温升高到39℃时，人体出汗和皮肤的热传导也不再增加。体温超过39℃，人体会出现全身的不适，体温升高到43℃时，只要几分钟，人就虚脱，严重的会死亡。但人在高温环境下进行锻炼和逐步适应，则有可能在高温环境中生存和活动，这叫做“高温习服”，对多数人，在经过锻炼和适应后，能在49℃的环境中生存和活动一定时间，但约有6%的人对于高温难以习惯和适应。应该说，人体适应环境冷热变化的的温度范围相当宽，但人体感觉舒适的温度范围却窄得多，通常认为21±3℃是人体舒适的范围，环境温度在29℃以上就是人体所不适应的高温。除了环境温度是影响人体舒适程度的主要因素外，大气中的水蒸气分压和气流流动速率也影响人体和环境的热交换，也影响人体的舒适程度。

由于天气变化引起的高温（热浪）和低温（寒流）有波及范围广、持续时间长的特点。例如，1988年4月，孟加拉两周持续40℃以上的高温天气；同年，印度、原苏联的欧洲地区、南欧和我国的黄淮地区、长江流域都出现持续高温天气，即整个北半球都处在长期高温环境。1969年1月下旬从原苏联和欧洲向我国波及的寒流使我国的新疆到华南出现罕见低温，西北地区日平均气温降低12～20℃，华南一带降低15～20℃，南岭一带竟降温25℃。这种天气变化引起的冷热环境改变，虽然是非人为的，但其影响之大，范围之广、持续时间之长，都会对人类活动产生强烈影响：交通受阻、电力中断、人员伤亡并同时诱发其他灾害和疾病。

四、人类活动对热环境的影响

由于人类活动大量使用各种化石燃料，致使大气层中的CO_2含量增加，因此会产生温室效应和反射效应。

1．温室效应

大气中的CO_2能使太阳辐射穿过大气层，并吸收地面由于接收到太阳辐射而温度升高所产生长波辐射，这种使大气层温度升高的热效应即温室效应。目前，全球由于使用化石燃料和其他化学制剂排放的以CO_2为主的温室气体，每天达6000万t（1995年全世界CO_2排放量已达227.714亿t），使大气层的温度升高。但是由于大气不断的运动，其中大尺度运动

的湍流使大气中由于温室效应而增加的热量随大气的流动而一部分弥散，亦即抵消了一部分由于 CO_2 增加而产生的大气层增温效应。已经表明，若大气层中没有湍流，则大气层中的 CO_2 从 150ppm 增加到 300ppm 时，全球平均气温度升高 3.8℃，大气层中 CO_2 从 300ppm 增加到 600ppm 时全球平均气温升高 3.6℃。但是由于存在大气湍流，大气层中 CO_2 从 150ppm 增加到 300ppm 时，全球平均气温仅增加 2.8℃，大气层中 CO_2 从 300ppm 增加到 600ppm 时，全球平均气温仅增加 2.4℃。要说明的是，“温室效应”这个名词并不准确。温室是使人联想到玻璃温室，但大气中的保暖作用与玻璃温室是有区别的，玻璃温室有隔绝空气流动的功能或作用，而在大气层中的温度增加和保持过程则是与大气的流动联系在一起的，即大气层中的热量积存、温度升高与大气在各种尺度上的流动是相关的。

还有一种理论认为，由于冰雪能反射相当一部分太阳辐射，因此大气层的温度与地球上的冰雪覆盖面积有关。当大气层中 CO_2 含量增加时，由于气温升高，冰雪融化，使整个地球对太阳辐射的反射减小，因而温度增加，这是一个正反馈的过程。有研究认为，若今后大气层中的 CO_2 以每年 0.7ppm 的速率增加，到 21 世纪中期，全球现有的冰雪可能有一半融化。

还有一种观点认为，大气层中的 CO_2 增加和尘埃增加会引起“阳伞效应”。即大气层中的 CO_2 和微尘增加会使大气层浑浊，因而总体上增加了对太阳辐射的反射，因此由于大气层中 CO_2 等温室气体和微尘的增加，大气的温度还有某种程度的降低。与之类似的例证是，地面若是绿地植被，则对太阳辐射有较强烈的反射，而地面的各种用人工材料组成的建筑物则对太阳辐射的吸收要明显大于反射，因此大城市和大城市的郊区存在明显的温度差异。有统计认为，纽约、柏林、巴黎、莫斯科等大城市城区和郊区的年平均温度可相差 0.7～1.1℃。

应该说，温室效应和阳伞效应两种作用都存在，由于人类活动的规模越来越大，因此对大气层化学成分的变化确有影响（1971 年美国纽约消费的能源已经相当于当地接收到的太阳辐射的 40%）。但从全球范围而论，人类活动对全球热环境的影响虽然不能低估（例如，由于大气层中温室气体的增加，使全球气候变暖，以及由此引起的全球荒漠化、海平面上升等生态环境问题，应该予以关注），但人类活动对地球热环境的影响和日地关系以及其他自然条件这样大尺度、长周期的变化造成的后果相比，究竟还是有限的。

2. 水体的热污染

由于向天然水体排放温热水，使天然水体温度升高，影响水生生物的生存环境和人类的生产和生活时，称水体受到热污染。当然，海洋中的暖流不属于热污染。

水体的热污染主要来自工业的冷却水，其中最主要的是电力工业的冷却水。根据美国的统计资料，电力工业的冷却水占全部工业用水量的 81.3%，其次是冶金工业冷却水，用量占冷却水用量的 6.8%，化学工业冷却水用量占 6.3%。电力工业中火力发电的热效率约 37%～38%，除了有 10%～15% 的废热从烟囱排出，冷却水排出的废热占一定比例。核电站是水体热污染的重要来源。一般轻水反应堆的热效率为 31%～33%，即反应堆芯铀、钚裂变产生的热，约有 2/3 由冷却水排出。目前全世界已经有 429 个核反应堆用于发电，发电量已经占全世界发电量的 17%，其冷却水排出的热量是很可观的。我国电力工业的冷却水用量约占工业冷却水用量的 70%。10 万 kW 的火力发电厂，每秒钟产生 7t 冷却水，其温度比使用前高 6～8℃。

水体的热污染会使水中的溶解氧含量降低，使水中的化学反应速率改变，使某些水中的

化学物质（如重金属和氰化物）的毒性增加，从而使水生生物的生态环境发生改变，例如，水温的变化可使某些鱼类的洄游、繁殖习惯发生变化。尤其是水温的突然变化会使鱼类死亡，例如，水温突然升高 16.7℃，大马哈鱼会在 10s 内死亡，刺鱼则会在 35s 内死亡。另外，如果水温突然降低也会使某些鱼类受“冷冲击”而昏迷或死亡。

热污染的排放有沿水体表层排放和倾没排放两种。沿河流表层排放的热水向深度方向的弥散一般不超过 5m，但可能在沿水流方向形成千米长的热污染带。在风向与热水排放方向相反时，在河流入海口排放时，由于潮汐作用，热污染区还可能向河流上游延伸。热污染主要靠自然水流对热的稀释或冷却使热污染逐渐消失。

河水受热污染所允许的温度变化（升高）应该是环境经济学的问题。我国《地表水环境质量标准》（GHZBl—1999）规定，人为的环境水温变化每周不得大于 1℃。国外的标准则是从保护鱼类出发。如美国国家技术咨询委员会（NTAC）在有关水温的水质标准中建议，向河水中添加的热量不得使在任何月份的水温超过 2.8℃；在湖泊和水库中则不得超过 1.6℃；对近海和海湾排放热水，造成的该海域的温度升高，在夏季不允许超过该月平均温度 0.83℃以上，在冬季不允许超过该月平均温度的 1.2℃以上；由于人为原因造成的海水温度变化每小时不得超过 0.56℃。

除了水体的热污染外，有关城市的热岛效应等大气热效应问题，已经在第二章中有所叙述，此处不再重复。

五、我国的光热资源

本节一开始就提出，太阳辐射是地球上生命现象的动力，因此太阳辐射在地面产生的光和热是一种资源，其主要作用之一是使地球上的生命现象得以延续：使农作物生长，使动物生存和繁衍。

太阳辐射产生的热资源通常用各种温度指数表示。例如，小麦是耐寒作物，在南纬 40°～北纬 60°范围内广泛种植，其发芽温度为 4～5℃，生长最适宜温度为 15～20℃；玉米则是喜温作物，种子发芽的最低（下限）温度为 7℃，适宜萌发温度是 12℃，栽培界限是夏季平均气温 19℃或夏季夜晚平均气温 12℃以上的区域；水稻是喜温作物，多数水稻品种的发芽温度在 10℃以上，开始生长的温度为12～14℃，苗期适温为 20～32℃，在抽穗扬花季节若温度过高，则花粉败育，稻谷不实率增加。棉花是喜温喜光的耐旱作物，在 15℃时 12～16d 发芽，20℃时 6d 即可发芽，最适宜的生长温度是 25～30℃，气温降到 0～2℃时叶片受冻，－1℃时死亡。通常将气温≥0℃的累计持续日数称为喜温农事期，＞5℃的持续日期为生长期。

另外一种指标是积温，即农作物生长发育阶段逐日温度的总和，其单位为℃·d（度·日）。通常有活动积温和有效积温两种表示方法。但气温超过农作物开始生长的下限温度（T_b）时，气温 $T > T_b$ 时的温度称为活动温度，气温超过下限温度的天数的日平均气温（t_i）的总和即为活动积温（记为 T_a），其计算方法是：

$$\sum_{i=1}^{n} = t_i \qquad (\text{当 } t_i < T_b \text{ 时,记 } t_i = 0)$$

农作物生长的气温高于下限温度（$t_i > T_b$）时的日平均气温与下限温度之差（$t_i - T_b$）称为有效温度，在生长季内，有效温度的总和即是有效积温 T_e：

$$\sum_{i=1}^{n} (t_i - T_b) \qquad (\text{当 } t_i < T_b \text{ 时}, t_i \text{ 取 } T_b \text{ 值,或 } t_i - T_b = 0)$$

通常用大于某个界限温度（如 0℃）的积温来表示该地区的热量条件（或热资源。例如，华北平原的多数地区＞0℃的活动积温为 4500℃·d（度·日），冬小麦在整个生长季共需要积温 2000～2100℃·d，夏玉米需要积温 2200～2300℃·d，两种作物共需积温 4200～4300℃·d，则该地区可一年两熟（冬小麦和夏玉米），若某地区的积温仅 4000℃·d，则没有条件一年两熟。

我国的南岭南部、云南南部、四川盆地的年平均气温＞0℃，即整年为农事期；秦岭、淮河、长江流域日平均温度＞0℃的天数为 320～350d，华北平原为 250～320d，大小兴安岭为 200d，青藏高原仅 150d。

温度高于 0℃的积温分布与年平均气温分布类似，南岭以南为 7500℃·d 以上，其中台湾、海南、两广南部达 8000～8500℃·d；长江流域和南岭以北为 5500～7000℃·d；四川盆地为 5500～6500℃·d；华北平原为 4000～5000℃·d；东北平原为 3000～4000℃·d；大小兴安岭为 2500℃·d；青藏高原仅 1000～2000℃·d。总体上说，我国的太阳辐射资源条件类型多样，季节变化明显，日照充分，这些都是农作物生长的有利条件。

小　　结

大气层中的主要热学过程包括非绝热过程和绝热过程。大气层中污染物的输运与扩散受大气层的温度、湿度、降水、风和湍流、日照、云（云量和形状）影响，其中最重要的影响因素是风、湍流和温度。

海水温度受太阳辐射的影响，表层水温随纬度和季节变化。海水的温度变化对大气温度的变化有明显的影响，是地球上气候变化的重要因素。尤其是海水蒸发，从海水中吸收热量输送进入大气层，不仅影响大气层和海洋的水分交换、热交换，还影响洋流和气候变化。污染物在水体（河流、海水、湖泊、地下水等）中的迁移和扩散和水体的温度有关。

地球内部的温度及热量传输是地球内部运动驱动力的重要方面，地温随深度增加而增大。地热的主要来源是地球内部放射性物质衰变，而且主要来自长半衰期的放射性元素（^{238}U、^{235}U、^{232}Th、^{40}K 等，其半衰期都在 10 亿年以上）。

地热资源将成为人类开发和利用的重要资源。地热资源的类型有蒸汽型、热水型、地压型、干热岩型、岩浆型。我国的地热资源也可分为四种类型：火山岩型、新生代花岗岩型、盆地和古潜山型、石灰岩山地型。我国地热资源的特点是分布面广，除了上海和宁夏外都发现了可开发利用的地热资源。目前世界各国开发利用的地热资源主要是蒸汽型的和热水型的，可用于医疗保健、温室养殖、取暖和发电。自 1904 年意大利建成世界上最早的拉德雷诺地热发电站以来，现在已经有 20 多个国家用地热发电。美国是世界上利用地热发电最多的国家，但地热发电仅占全国能源消费的 0.0036%（1995）。目前，世界开发的地热水总量折算为发电量约 365 亿度。

地热资源的利用也存在一些问题。地热资源往往只能在产地有使用价值；高温地热水在输送到地面或在管线中会因所含矿物质的沉淀而结垢，有的地热水含硫化氢等腐蚀性物质，除了腐蚀管线外，还可能污染空气；高矿化度或含有害成分的地热水的排放可能污染浅层地下水或地表水；过热的地热水排放还可能产生热污染；长期大量开发浅层地下水还可能造成地面沉降。

地球上的全部能量都来自太阳，太阳辐射是地球上生命现象的重要条件，是生命现象的

动力。太阳辐射和地球上的热平衡，以及由此决定的地表的平均温度是地球上生命和生物演化的最根本条件。人类活动也会对地球热环境产生影响（如“温室效应”、水体热污染等），而地球热环境的变化会影响生物和人类活动和生存。

思考题

（1）地球环境保持一种热平衡对地球上生物和人类的重要意义是什么？

（2）地热资源的来源是什么？在开发和利用地热资源过程中应注意哪些问题？